地球，我的母亲！
我的灵魂便是你的灵魂，
我要强健我的灵魂，
用来报答你的深恩。

——郭沫若

前 言

地球是现今人类所知惟一具有生命繁衍和高度文明发展的小天体，是生命的摇篮，我们只有一个地球。

历史和现实一再表明：地球运动和地球环境变化，不仅直接影响着人类生命的未来，而且严重威胁到人类社会的发展与进步，因此人类应科学地了解地球，认识自己的家园，并应用地球规律，规范、协调和改造地球人类、地球生物及非生物不适宜的自私和自然行为以及种族和民族陋习、恶习，科学地实行可持续发展。

根据现有资料，地球已有46亿a的演化历史了。它不是一个单一的星球，而是一个由岩石圈—地幔—地核、大气圈、水圈及生物圈（含人类圈）等共同组成的一个开放系统，即当今科学界所称之的地球系统。地球系统的突出特点是具有很高的复杂性。非常复杂的系统即巨系统，巨系统是不同子系统之间的耦合，物理—化学—生物三大基本过程形成了分枝很多的因果链，构成地球科学新的理论体系，很明显，这一新体系具有6大基础自然科学（数理化天地生）大跨度、多层次交叉渗透的特征，是现代地球科学及其可持续发展战略的科学基础。

在人类进化到21世纪，人口（持续增长）—资源（过度开发）—环境（日趋恶化）—灾害（频繁发生）对地球人类生存发展的矛盾已尖锐地显现出来、各种反思开始萌动的时候，作为肩负历史重任和新世纪拉幕人的年轻一代，对地球——包括地球的宇宙环境，地球运动及演化历史，地球不同圈层的基本构成及物

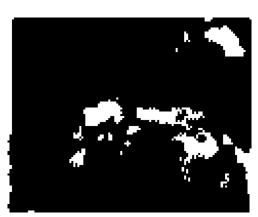
质—能量转换，地球系统的过去、现在和未来，人类社会与可持续发展的资源—环境—灾害的基本状况的再认识和再了解是十分必要的。目前世界各国都正在对地球科学的历史使命进行新一轮的战略调整，其总体框架是从对地球过程的认识到付诸实施地球管理，即过程（认识）—资源（利用）—管理（保护）三位一体的主导理念。也基于学科基础，有理由相信经过20世纪“地球科学革命”洗礼的这100个基本问题，将使人们从之前对地球的盲目猜想和错误理解，以及对地球愚昧迷信和宗教偏见的禁锢中解放出来，朝着保护整个地球村，为子孙后代留下一个适宜的生存基础的长远目标而继续前进。

由于是科普写作，是传播已知的地球科学知识，为了广泛采纳和吸取精华，所以参阅和引用了大量有关资料和文献，以及面向21世纪的大学和研究生教材，当然也融入了某些讨论性的问题及不成熟的最新发现和进展，以及基于现有资料的某些个人观点。书中的插图和图片也均取自有关的论著或引文，原作及译作者比较广泛，难以逐一罗列和澄清，在此均一并表示歉意和感谢。

科学需要极大的普及和提高，编者所做的科普努力也正在于此。希望对提高全社会地球科学素质有所帮助，更希望21世纪的年轻一代能投身到这一充满奥秘的科学海洋中去遨游和拼搏。

目　　录







一、地球的起源与演化

001 宇宙大爆炸与太阳系的形成

宇宙是怎样开始又是怎样形成的？太阳系及我们居住的地球是从哪里来的？怎么会有这一切？而我们又是谁？这是地球人类不懈追求和热情探索的复杂问题，可以说自古至今奇妙的假说和模型相当多。据有关资料，自1755年德国学者康德（I. Kant）提出太阳起源的星云说① 以来，已经有50多种假说（刘本培等，2001）问世，但大都为思辨式的假说，而作为观测宇宙的科学学说则是近代物理学发展的结果。目前最有影响，并为科学家所普遍接受的学说则是宇宙大爆炸学说。

宇宙大爆炸学说是有俄国血统的美籍学者伽莫夫（G. Gamov，1948）等人根据核物理和高能物理研究成果，以广义相对论为理论基础，以宇宙正在膨胀的观测事实为根据提出来的。该学说认为，时间、空间、物质、能量都起始于150亿a前的一次大爆炸，大爆炸之初是一个超高温、超高密度的“奇点”（宇宙起源于大爆炸奇点）在10^{-44}s（普朗克时间）的瞬间体积急剧暴胀，在10^{-34}s内迅速膨胀约10^{100}倍，宇宙的温度高达10^{32}K②，辐射热能量为10^{28}eV③，原子和分子均无法存在。大爆炸以后，物质

① 康德的基本思路是：尘埃微粒云→团块→太阳、行星和卫星。

② K即“绝对温度”也称“开氏温标”，热力学温标的零点即绝对零度，用“0K”表示。0K = －273.16℃。

③ $1eV = 1.6 \times 10^{-19}J$。



开始膨胀，密度相应降低，形成了当今观测到的各种类型天体的宇宙。

怎么才能证明 150 亿 a 前所发生的上述一切呢？按照大爆炸理论，由大爆炸形成的星系，目前测得最老的年龄也只有 100 多亿 a，符合理论推断，这是其一。其二，探测到了宇宙大爆炸所引发的各向同性的“微波背景辐射”。G. 伽莫夫等曾预言，在大爆炸特殊宇宙背景下产生的微波辐射时至今日仍存在于宇宙空间中，其等效温度约为 5K。1964 年，美国贝尔公司的工程师彭齐亚斯（A.A.Penzias）和威尔逊（R.W.Wilson）为改进卫星通讯系统，意外地发现宇宙中有消除不掉的微波背景噪音，除与 3K 黑体辐射一致外，其空间分布各向同性、均匀。经过科学家们 10 多年的不懈努力，终于证明了在宇宙背景中有 2.7K 的黑体辐射。这一发现使宇宙大爆炸模型获得了最强有力的实验证据。为此，彭齐亚斯和威尔逊分享了 1978 年的诺贝尔物理奖。1989 年在距地面 900km 的轨道上，由美国发射的探测卫星（COBE）证明，宇宙背景辐射是 2.726K ± 0.010K 的黑体辐射，能谱畸形幅度小于 0.03%。其三，天文观测发现，多数河外星系的谱线红移①，即向波长增加的方向移动，而且红移量大致同星系的距离成正比。如果将红移解释为多普勒效应，则所有星系都在离我们而去，意味着宇宙中所有的星系都彼此远离，宇宙处于膨胀之中。如果星系目前正在彼此远离，那么在宇宙创生时必定靠得很近。按照哈勃（E.P.Hubble，1929）定律，全宇宙处于极其高密状态，物质与反物质、物质与能量均呈平衡状态，也就是说，发生“大爆炸”是可能的。其四，观测到不同天体上氦的宇宙丰度为 23.6%，而英国皇家格林尼治天文台的天文学家对原始星云进行

① 当发光星体接近观察者时，见到的星光谱线向频率高的蓝光方向移动，称蓝移；当离开观察者时，向频率低的红光方向移动，称红移。



发射光谱观测，结果为 23.5%。这一结果进一步支持了宇宙大爆炸学说。

大爆炸之后，物质开始膨胀，但不是太阳系或银河系等星系在膨胀，而是空间在膨胀，即整个宇宙的尺度在均匀变大，从而构成了今天如此广袤的宇宙空间。大爆炸的整个过程是复杂的，其演化大致可区分为基本粒子（质子、中子、电子、光子及中微子[①] 等）形成阶段——元素起源阶段（辐射阶段）——实物阶段。实物阶段在大爆炸后约 100 万 a 前后。由于宇宙膨胀，温度下降（约为 10^5K），辐射减退，所以宇宙间主要是气状物质。气物质在引力作用下凝聚成气体云，气体云收缩就产生了各式各样的星云、星系和恒星。在无数恒星的演化中产生了太阳系、行星、卫星等。原始地球就是在 46 亿 a 前由许多星际颗粒积聚而成的。可知：在地球诞生之前，包括地球在内的太阳系首先诞生。太阳系的诞生时间一般认为在 50 亿 a 前，由于太阳系的前身为在涡流中形成的原始星云，所以一开始就不断旋转，角动量(转动物体对于转动轴的转动惯量与转动角速度的乘积）很大。当原始星云在万有引力作用下收缩，并收缩到一定大小，当边缘处惯性离心力等于原始星云中心的吸引力时，在原始星云的赤道面上便形成了星云盘。星云盘直径约为 8×10^9km（相当于地球至太阳距离的 53 倍），厚度约为 6×10^7km，质量约为太阳质量的 1/10。随着星云盘内大小不等的固体颗粒的相互碰撞，形成了尘层—星云盘，尘层因引力不稳定而瓦解后便形成星子（大星子），星子不断破裂碰撞、集合而聚集成行星胎，星胎的中心即原始太阳。由这种模型形成的太阳行星系统即现代星云说（新星云说）。20 世纪后半叶，天文学家们相继观测到的从星际云到恒星之间

① 中微子（neutrinos）是一种不受电、磁、核力影响的基本粒子，1998 年证实中微子具有极微小的静止质量。



的一系列过渡天体，以及许多恒星周围存在的气体—尘埃星云盘的事实即为现代星云说的主要根据。

现代星云说所形成的太阳行星系统还具备以下共同运动特征：

1. 同向性，大行星和小行星的公转方向都相同，而这个方向即太阳的自转方向；

2. 共面性，大行星环绕太阳的公转轨道几乎在同一平面上；

3. 近圆性，大行星的轨道形状大多接近正圆形，轨道扁平程度即偏心率都很小（惟有水星和冥王星的轨道明显呈椭圆形），这也是现在观测到的太阳系行星的运动特征。

原始行星距太阳有近有远。距太阳近的小行星区（包括水星、金星、地球、火星区域）温度高、冰物质（主要是碳、氮、氧及其氧化物）和气物质（包括电离氢、氧气、氦和氖气）大部分被挥发，因此形成的行星密度大，但小行星区的宽度小，所以小行星的质量和体积都小。离太阳稍远的巨行星区，冰物质和土物质（主要是铁、镁、硅、镍及其氧化物）凝聚为星子，不少气物质也凝聚到行星上，形成体积大而密度小的巨行星——土星和木星。离太阳较远的外行星区（天王星、海王星和冥王星）受太阳的引力弱，一方面气物质易逃逸，因而密度比巨行星为大，另一方面外行星区可以被吸积的物质比土星、木星区少得多，所以外行星区较巨行星区行星质量和体积较小。这种行星排布与观测到的“两头小中间大”的事实是相一致的（图001－1）。

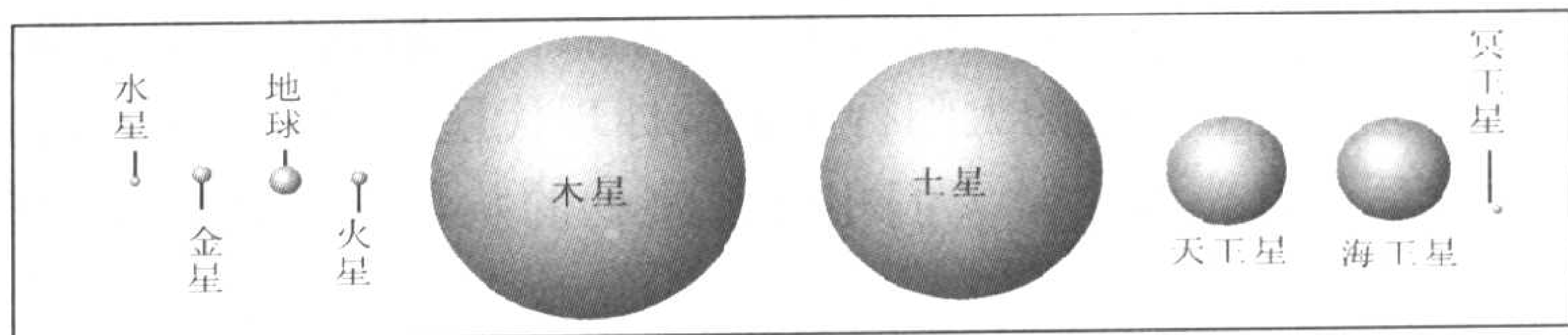


图001－1　太阳系各行星的大小



现代星云说由我国著名天文学家戴文赛等(1978)提出,基本思路是:星际弥漫物质→原始星云→星云盘→尘层→粒子团→星子→行星胎和卫星胎→行星和卫星。戴文赛等主张共生星云说,反对偶然性的灾变说(分出说),但不排斥灾变在太阳系演化中的作用,并认为水星、金星、火星、月球,甚至小小的火星卫星和许多小行星上的环形山和凹坑都是星子撞击的遗迹,而太阳系里的重元素可能是来自太阳星云附近超新星爆发时的"污染物"。

现代星云说虽然较好地解释了太阳系的现有结构和运动特征,但也仍然存在许多疑团。既然地球是太阳星云引力吸引收缩而形成的,引力应同等吸引所有物质,为什么地球上的元素丰度不一致;在地球形成时星云环中的粒子不断地冲击地球,由碰撞动能转化来的热能否将地球熔化,这种熔化过程又怎样影响着地球等等,诸如此类的问题都是未解之谜,还需要随着航天科技的发展和观测空间的扩大去进一步地探索和解决,以彻底揭开宇宙大爆炸及太阳系形成之谜。

002 地球的太阳系环境

地球是宇宙中的一个特殊天体,是目前所知宇宙中惟一有人类居住、有高度文明发展的星球。地球是太阳系家族的成员之一,是太阳系内的一颗普通行星,因此,地球的宇宙环境主要是地球的太阳系环境。太阳系是由中心天体太阳及在其巨大引力作用下环绕它运行的行星、卫星、小行星、彗星、流星体和行星际物质所组成的天体系统。在地球上生活的人类,以地球为参考系看太阳系等天体系统的其他星球,它们都在"天上",而在宇宙飞船和其他天体上看地球,则地球也是在"天上",是"天上"一个生机盎然的星球。

在太阳周围分布着9大行星,行星是太阳系的主要成员。按距太阳距离由近到远排列成行星系,依次为水星—金星—地球—



火星—木星—土星—天王星—海王星—冥王星。9大行星① 在绕轴自转的同时，也在各自轨道上绕太阳公转。

围绕行星运动的天体称卫星，除水星和金星外，其余7大行星都有卫星。就地球而言，除天然卫星（月球）外，还有许多人造卫星。此外还有不少空间探测器和宇宙飞船在太空中遨游。

小行星是沿椭圆轨道绕太阳运行的小天体，直径大多小于60～70km。数以万计的小行星分布在火星和木星轨道间，构成小行星带。彗星外貌呈雾状，并以扁长椭圆轨道绕太阳运行，为质量较小的天体，目前观测到的彗星已超过1000多颗。行星际物质由气体微粒和固体尘埃所组成。

太阳是太阳系的中心天体，太阳的质量占太阳系质量的99.865%，也是太阳系中惟一有热核能源辐射的发光恒星，与地球的平均距离约为14960万km(1.49597870亿km)，即1个天文单位(AU)。这是一个十分美好的距离，因为在这个距离内，地球从太阳射出光线中吸收的热量与地球辐射到宇宙中的热量恰好达到平衡，而这种平衡正好使地球表面的大部分水分呈液态形式存在，液态水对地球生命的存活是至关重要的。太阳的半径是地球半径(6371km)的109倍，体积是地球体积的130万倍，质量约2×10^{27}t，相当于地球质量的33.3万倍，平均密度约为地球平均密度($5.52g/cm^3$)的1/4，但各部分密度差别很大，表面为$10^{-7}g/cm^3$，中心高达$90g/cm^3$。太阳系的引力范围为15万AU。太阳又是太阳系光和热的源泉，它的能量主要来源于太阳中心的氢—氦聚变。据学者们估算，1g氢聚变为氦核时能产生6.21×10^{11}J的热能(相当于2700t标准煤所产生的热量)。然而地球从太阳获得的能量

---

① 近年来根据观测与理论推算，太阳系的第10颗行星“冥外星”很可能是存在的。但也有一些天文学家动议，因冥王星太小了，建议将冥王星从太阳系家族中“开除”出去。冥外星就更不用说了。



却极少,仅相当于太阳向宇宙辐射能量的22亿分之一,就是这极小部分的太阳能就足以维持现代地球表面各种自然现象和生物繁衍的进行,由此可知,太阳能对地球的影响多么巨大。此外,太阳活动对地球磁层、电离层、地磁场,以及地球地震活动和地球厄尔尼诺现象等都有着深刻的影响。

目前的太阳系有9大行星。如以地球为准，则水星和金星为地内行星，其他6大行星为地外行星。如以小行星带为界，则水星、金星、地球、火星为内行星，其他5个行星为外行星。如以理化性质差异划分，则相似于地球的行星称类地行星，为地球、水星、金星和火星；相似于木星的行星称类木行星，为木星、土星、天王星和海王星。类地行星卫星数量较少或没有卫星，类木行星卫星数量多。

考虑到行星特征差别与太阳系演化有关，又可把类木行星加上冥王星分为巨行星（木星、土星）和远日行星（天王星、海王星、冥王星)。巨行星卫星最多，质量和体积最大，本身有辐射热源。远日行星除距太阳较远，温度较低外，多数性质则介于类地行星和巨行星之间。

太阳系的小天体包括小行星、彗星以及流星和陨石。小行星较多，目前已编号的有近5000颗，多数是碳质的，少数是石质的和铁质的。多数学者认为，小行星是在太阳系诞生初期，原始弥漫物质未能凝聚成大行星的结果,而小行星带则可能是一颗大行星破碎后所形成的。彗星是绕太阳运行的一类体积庞大、质量较小的云雾状天体,已发现的彗星有1600多颗,但计算出其运行轨道的只有600颗。流星是行星际空间游荡着的无数尘粒和团块的集合体(流星体),流星来源于残存的原始星云和小行星的撞击颗粒、彗星的碎片、行星和大卫星的喷发物等。大块流星体从行星际空间穿过地球大气层后如尚未燃尽,其剩余部分落到地面即为陨石,也就是说,陨石是指星子从行星空间穿过大气层后到达地表



的流星体残骸。按其化学组成可划分为三大类：石陨石（以硅酸盐矿物为主）、铁陨石（以铁镍金属为主）和石—铁陨石（铁质和石质的量约各占 1/2）。陨石是人类最早能直接接触到的地外物质，它携带有太阳系的化学成分及空间环境的丰富信息，对太阳系的起源和演化，对有机质的起源和成因，具有重要的研究意义。

003 地球的天然卫星——月球

月球是地球惟一的天然卫星，是距离地球最近的天体，通过与月球的比较可以更深刻地了解地球演化，因为月球与地球不仅同期（46 亿 a 前）形成，而且至今仍与地球相互吸引，共同绕转（月球绕地球公转，地球又带着月球绕太阳公转），构成太阳系中的地月系。国际上所采用的月地平均距离为 384401 ± 1km，相当于地球半径的 60 倍，是日地平均距离的 1/38。其他物理参数为：月球半径 1738km，约为地球半径的 3/11；体积 $2.199 \times 10^{10}km^3$，是地球体积的 1/49；月面面积为地球表面的 1/14，比亚洲面积略小。月球的平均密度为 $3.34g/cm^3$，较地球密度 $5.52g/cm^3$ 为小，约为地球平均密度的 3/5，宇航员从月面采回岩石的平均密度为 $3g/cm^3$ 左右，反映月球物质重力分异程度较低，内部缺乏金属核。月球的质量为 $7.35 \times 10^{25}g$，约为地球质量的 1/81；月球的逃逸速度为 2.36km/s，仅约为地球的 1/5；月面重力加速度 $1.62m/s^2$，约为地球表面重力加速度的 1/6；月球对月表物体的吸引力，即重力为地球吸引力的 1/6，这意味着一个重 60kg 的人，到了月球就只有 10kg 的重量了；月球年龄与地球基本一致，为 46 亿 a，月球的表面既不发热也不发光（仅反射太阳光），没气（大气圈），没有水① （水圈），没有生命，也听不到声音，是一个表

① 1998 年，美国航天局发布“月亮勘探者”号探测器发现月球两极存在大量冰态水，其资源量为(0.1 ~ 3)亿 t。如果月球陨石坑底部土壤水层特别厚，那么月球的水资源量可达 13 亿 t。



面呈灰白色,荒凉沉寂的世界。

月球的运动包括月球围绕地球公转和月球自转运动。公转运动在严格意义上说是绕地-月系共同质心（质心在地球内部4671km处）的运动。由于运动轨道是椭圆，所以在公转周期内存在近地点和远地点的运动速度差别，近地点时快（15°/d），远地点时慢（11°/d），平均约13.2°/d。月球绕地球公转时，大体上以同一面向着地球，所以在地球上只能看到略大于半个月球（59%）的月貌，这是因为月球自转周期与它的公转周期相等（都是一个恒星月），自转方向与公转方向相同（都是反时针方向）的缘故。因此要了解月球背面就只能靠发射宇宙飞船去探测了。

月球的地质地貌类型如下。1. 月陆：是月面上的高地。2. 环形山：又称月坑，是月球地貌最为引人注目的景观。学者们认为，绝大多数环形山由陨石或小天体撞击而成。3. 山脉：类似于地球上的山脉，甚至较地球山脉更加陡峭。4. 月海：月海不是海，可以说滴水不含，而是月球表面比较开阔、比较平坦的大片平原，比月球表面低1.5～3.0km。5. 月谷和月溪：月谷类似于地球上的裂谷，呈直线状或锯齿状，十分壮观。月球表面的细小月谷、沟纹称月溪。月球上最耐人寻味的是环形山周围的辐射纹，一般认为辐射纹是陨石撞击月面所形成的。

月球的内部结构，根据月震波在月球内部的传播速度判断与地球类似，可分为月壳、月幔和月核3个圈层。月壳厚60～70km，比地壳平均厚度大4倍左右，其中上月壳厚2～25km，V_p为1～6km/s；下月壳厚25～65km，V_p为6.8km/s。月幔是一层密度比较大的岩石，深可达1500km，其中上月幔厚250～400km，V_p为7.7km/s，推测主要由富橄榄石岩组成。中月幔底面深度为800km左右，V_p为8.0km/s，在800～1000km深度，V_s比上下圈层明显减小，反映部分熔融，可能与地球软流圈对应，这就是



说，月球的刚性岩石圈厚度可达800km左右，比地球厚4~6倍，因此不可能有板块活动。从1000~1500km为下月幔，V_p为7.5~8km/s。下月幔到月心（深1738km）为月核，V_p比月幔为小（估计只有4~6km/s），表明月核可能是“软心”的，没有地球那个致密的铁心，所以月球不仅质量小、密度小，而且月表热流密度亦较小，平均值约为地球的1/5。目前探测到月球只有微弱的磁场，有弱地震（小于里氏3级），但月海中有重力场，说明月球内部物质分布并不均匀，寻找由重力场引起的月球矿床还是有可能的。

月球上能源贮藏丰富。主要是太阳能和核聚变燃料氦-3。由于月球无大气，太阳辐射能可大量注入月球表面，加之月球自转时间恰好与绕地球公转一周的时间相等，因此利用月球表面可以获得极其丰富的太阳能。月球另一丰富的能源是地球上罕见的氦-3。氦-3是氦的同位素，氦是地球大气中的一种稀有气体，在干燥空气中约占空气体积的0.0005%。氦-3源自太阳，是随太阳风进入大气的，但在大气中极稀薄，在地球大气中不超过100kg，无法利用。因为氦-3离子带电，想浓缩必须具备两个条件，一是不能有磁场，二是不能有大气压，这在地球附近的星球中，只有月球具备这些条件。此外，月球表面的钛金属像海绵一样，可以大量吸附太阳风吹来的氦-3。这些都是月球岩石表面蕴藏有氦-3资源的特殊条件。氦-3被科学家视为第二代能源，是比氢更清洁（几乎无污染）、更廉价、更安全的能源，也是地球人类最具开发前景的能源。据测算（欧阳自远，2001），如果月球上的氦-3全部用于发电，可供全球用电1~5万a。美国宇航局表示，去月球开采氦-3原则上是可行的。因为开采、加工和运回氦-3所消耗的能量与用氦-3发电得到的能量比为1:250。

月球表面的岩石中钛（铁矿）资源也很丰富，专家们估算不



少于2万亿t。此外还含有丰富的铝、稀土、钍、铀、铁、镁、磷、铬、镍、锰、钾等矿产。它们都是支撑地球未来可持续发展的资源储备。

我国于2003年3月已正式启动名为“嫦娥”探月工程计划，分为三期：一期是在最近2~3年发射月球探测器；二期发射月球探测器软着陆和月球车巡视探测；三期发射小型采样返回舱、月面钻岩机、月球机器人等，为载人登月和月球基地选址提供有关数据。

004 地球的自转运动

地球绕地轴旋转叫自转，其旋转轴叫地轴，地轴与地面的两个交点即地球两极。地球自转可视为刚体自转，自转方向（从北极上空俯视）为自西向东，与公转同[1]。自转速度为0.465km/s（公转速度为29.97km/s）。自转角速度为15.041°/h，自转线速度随纬度和高度的变化而变化，在赤道海平面上已超过音速，为464m/s，到南北纬60°几乎减少1/2，到两极则为零。

假如地球是一个均匀的球体，也不受外力作用，那它将绕轴做等（角）速自转，然而据科学家们的研究[2]，由于地球所处宇宙环境及地球内外圈层结构的不均匀性，从而导致地球自转产生了十分复杂的物理运动。主要有两个方面：一是天文学理论可预测的变化，例如地球自转的潮汐[3]变化，以及地球自转轴相对于空间惯性参考系的岁差和章动等，这些运动与太阳、月球及行

① 地球自转周期为23h56min4.1s；公转周期为365d6h9min10s。

② 地球的自转运动主要按叶叔华院士的有关论著编写。

③ 潮汐：由于日、月潮力作用，使地球的岩石圈、水圈和大气圈中分别产生的周期性运动和变化的总称。习惯上“潮汐”仅指“海洋潮汐”，即日、月潮力作用引起的海面升降。



星对地球的引力有关；二是不可预测的变化，主要与大气、海洋活动及地壳、地幔、地核以及它们之间的能量交换有关。不可预测的变化主要来自两个方面：1. 地球自转轴与地面交点的漂移即极移，在地质历史上，古地磁已给出了地极长期大尺度漂移的变化轨迹；2. 地球自转速率变化即日长变化。

1. 极移：也称地极运动，即地球南北两极在地球表面的位置变化，反映整个地球相对于地轴的运动，可以通过对纬度变化的长期观测进行标定。图004－1为20世纪（上图）以来和20世纪70年代（下图）以来所测得的地极运动的 x（指向 $0°$方向）和 y（指向西经 $90°$子午线方向）两个分量的资料序列。由图可见，在极移变化中伴随着周期性振荡过程。

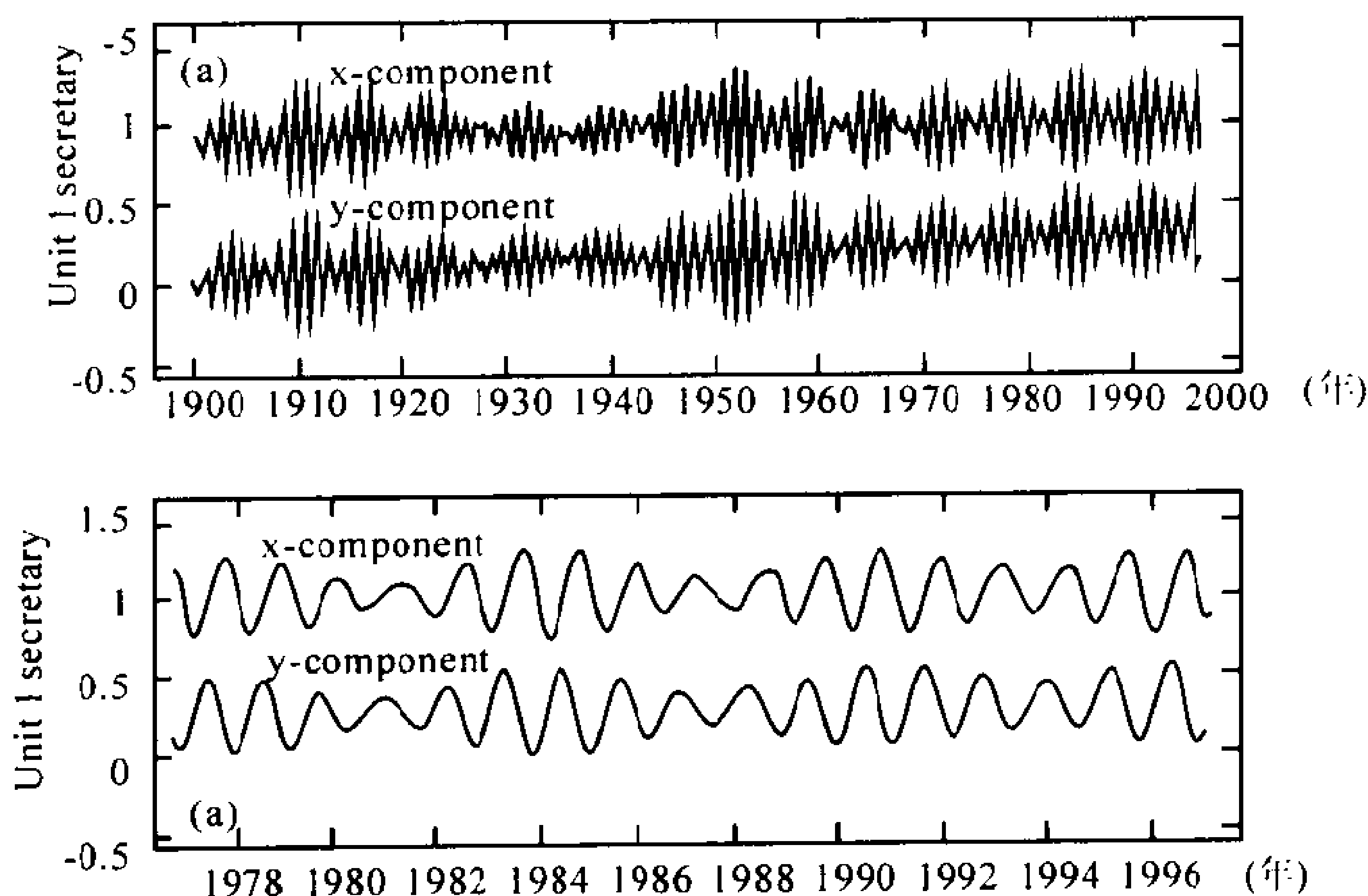


图004－1　极移的 x 和 y 两个分量的变化

（叶叔华等，*1997*）

图中所显示的 x 分量平移了＋1sec（1角秒）

Chandler摆动：也称自由欧拉章动，代表地球的一种自由摆动。约14个月为一周期，是极移变化中的主要周期性振荡，也



是地球对赤道力矩的共振响应。共振的阻力主要来自地幔的滞弹性响应和洋底牵引。阻力作用使 Chandler 摆动的振幅随时间有显著变化，但不会衰减至零，这说明还存在有其他激发机制。虽然从理论上已证实地核流场在核幔边界上的压力矩（作用）足以激发 Chandler 摆动，但迄今还没有观测证据。

周年摆动：即以 12 个月为周期的受迫摆动，是极移变化中的另一周期性振荡。无论从空间或时间尺度来看，周年摆动比 Chandler 摆动要稳定。周年摆动的现有观测资料表明，大气压变化对极移周年摆动的激发在 50% 以上，而大气中的风力和地下水资源量变化的贡献分别为 20% 和 10%，这说明还有其他激发源，比如海洋物质的再分配等。此外，在极移序列中还存在着长期变化，这种长期变化目前认为主要归因于千年以上的冰期后地壳回弹。

2. 地球自转速率变化：也称日长变化（LOD）。日长变化量 ΔLOD 的简单表达式为：

$$\frac{\Delta LOD}{86400s} \approx \frac{-\Delta\omega}{\omega_0}$$

式中 ω_0 是地球平均自转角速度，$\Delta\omega$ 为地球自转角速度变化量。可知：地球自转速率变化与日长变化成反向关系。

由历史资料及近代观测资料可知，地球自转速率变化主要来自三个方面的作用。

日长的长期缓慢变化：变化速率为（1.70 ± 0.05）ms/100a，即一个世纪内日长增加 1 ~ 2ms。过去 3000 年的古天文资料显示，日长变化存在“千年波动”，波动速率为 8ms/1000a。在地质历史上也存在日长变化。古生物化石（珊瑚、叠层石）骨骼上保存的生长条纹记录了当时的日长变化。目前已发现 4 亿 a 前的泥盆纪，每年约有 400d，6500 万 a 前的白垩纪，每年约有 376d，而现在每年为 365d，表明一年的日数在减少，也就是说，日长在



增加，地球自转在减慢。

日长十年尺度波动：目前还未取得地球自转“十年”波动激发的定量估计。

较小的高频变化：包括日长年际变化，季节（亚季节）性变化等。这些变化被认为是由大气角动量交换所引起的。

地球自转运动的变化在尺度上包含着从几天到几千年，以及不同地质时代的跨度变化，而与地球科学有关的变化主要是地球的自转速度变化对地震的触发作用。据学者们研究，地球某些构造带的地震响应与地球自转速率变化存在着相关性，例如我国东部（北东部）的某些构造带，在地球自转减慢时易发生地震，20世纪60~70年代上述地区的一系列地震活动就发生在地球自转减慢期，而我国西部某些构造带的地震则多发生在地球自转加快期，这说明地球自转变化可能是触发地震的因素之一（郑大伟等，1993）。除地震外，地球自转变化的其他地质效应，最早为我国著名地质学家李四光教授（1926）所研究，李四光认为地壳构造变动的发生与地球自转速度变化关系密切。当地球自转加快，并加速到一定程度时，则发生纬向或径向的挤压力，由此而形成了纬向（东西向）和经向（南北向）构造，以及各种扭动形式的构造体系。由于地球自转速度不断加快，在大陆地壳的“硅铝层”与“硅镁层”粘连不牢的那部分就会向西滑动。滑动在大陆壳层间会产生巨大的摩擦力，就像自动车阀一样减慢地球自转速度，谓之“大陆车阀”（Continental brake bypothesis）。“大陆车阀”使地球转速变慢，并发生构造变动，之后还会再一次加快，并发生与前次类似但方向相反的构造变动，这说明地球自转速度减慢或加快其本身就包含着二次加快或变慢的构造变动作用。

地球自转运动除使地球表面构造发生纬向和经向变迁外，在北半球自赤道向极地运动的物体还发生了向右偏转，在南半球发生了向左偏转的现象。这种现象由法国人科里奥利（G. Coriolis,



1835）首先发现，故称为科里奥利力（地轴偏向力）。科里奥利力（F）的表达式为：

$$F = 2mV\omega\sin\varphi$$

式中 m 为运动物体质量，V 为其水平运动速度，ω 为地球自转角速度，φ 为地理纬度，同一物体的 F 随纬度增高而加大。

科里奥利力对气团、洋流、河水的运动方向有明显影响，如北半球的洋流做顺时针方向运动，而南半球洋流做逆时针方向运动，北半球河流右岸冲刷强烈等。

地球自转速度变化与地球不同圈层中的多种突发性事件（如地震、极移、厄尔尼诺及海洋变化）之间可能存在着广泛而深刻的联系，但其确切成因机制尚不十分清楚，因为这是一个多学科的边缘领域。目前地球自转运动的多学科国际合作已经形成，21世纪将可以理解和解释地球作为整体系统中的各种变化，计算角动量的收支平衡，并可能对地震、厄尔尼诺等自然灾害的预测提供信息，有助于全球防灾减灾。

005 地球的形状和大小

在大地测量学中，地球的形状不是指地球自然表面的形状，而是指大地水准面的形状。所谓大地水准面即全球静止海平面，它是假设占地表3/4的海洋表面完全处于静止平衡状态，并把它延伸通过陆地内部所得到的全球性连续的封闭曲面的形状，曲面上处处与铅垂线垂直。大地水准面也是陆地上海拔的起算面，是一个等势面。

地球的大地水准面，经过精确测量，其形状不是几何上的旋转椭球体，纬线圈不是正圆，经线圈也不是真正的椭圆，地球的几何中心也不在赤道平面上，因此只能是一个不规则的扁球体。对这样一个不规则的扁球体可用一个理想的地球椭球体（参考椭球体）模型来予以对照，即以地球各地的大地水准面与“模型”



（参考椭球体）的偏离来反映地球的真实形状。结果是：地球赤道是个椭圆，长轴与短轴最大差为43km，地球北极处的矢径比地球短轴长10m，南极处的矢径比地球短轴短了30m，南纬45°处有隆起，北纬45°处有凹陷。对这样的形状是很难用简单的几何形状来描述的，只能说它是一个不规则的扁球体，通俗地比喻为“梨状”，即梨形地球。

根据国际大地测量和地球物理学会（1980）所公布的资料，20世纪所测得的地球大小的主要数据如下。

地球赤道半径（a）：6378.137km；

地球极半径（b）：6356.752km（平均半径为6371.0121km），地球极半径比赤道半径短21.385km；

地球扁率（f）＝（$a-b$）/a＝1/298.257（或1/298.256）；

地球赤道周长：40075.7km；

地球子午线周长：40008.08km；

地球表面面积：$5.1010\times10^8\mathrm{km}^2$；

地球体积：$10832\times10^8\mathrm{km}^3$；

地球平均密度：$5.518\mathrm{g/km}^3$。

在实际应用时，比如在制作地球仪和绘制小比例尺全球地图时，可把地球作为正球体对待，所谓正球体即地球球面具有相同曲率，而近代所进行的弧度测量表明，世界各地的地面曲率大致相等，在111km左右。在测大比例尺地图时可把地球作为参考椭球体。国际天文学联合会决定，从1984年起使用赤道半径a＝6378.140km，极半径b＝6356.755km，扁率f＝1/298.251的数据。但在发射人造卫星和轨道计算时，需要考虑各地对参考椭球体的具体偏差值。

20世纪80年代以来，人造卫星和宇宙飞船从地外空间发回了大量的地球的近照和远照，不仅取得了地球形状及其质量分布的大量数据，而且证实了地球是一个南北半球并不互相对称的



"球形"形状，地球的几何中心也并不位于赤道平面。比较而言，北半球较细较长，南半球较粗较短，地球的北极半径较南极半径长40m左右。这种非对称性表明，地球虽然是目前所知太阳系中惟一具有生命繁衍和高度文明发展的天体，但她仍然是一个扁球体。宇宙间绝对完美的东西是没有的。

现代科学探测表明，地球虽说是扁球体，但实际上有着更加复杂更加独特的形状，大陆有高山，海底有深沟，地球表面的真实形状是非常不规则的。之所以如此，完全是地球内部质量分布不均衡这一非系统性因素所造成的。

006 地球年龄与地质年表

地球年龄不是一个抽象的概念，它和人的生存年龄一样，具体而生动。人以年、月、日、时记年，而地球则以宙、代、纪、世记年，很明显，这是一个时间尺度和度量标准问题。

宇宙大爆炸理论认为，在大爆炸100亿a后太阳系形成，而地球作为太阳系的一颗岩石行星则诞生于46亿a前。46亿a是地球的天文年龄，是宇宙进化第三层次的开始①，而地球的地质年龄则是从地球开始有地质作用起到现在的年龄，这一年龄是可以精确计时的，计时单位通常以Ma（10^6a）表示，计时方法即以地球岩石（矿物）的同位素年龄测年，其理论依据是放射性同位素衰变定律，即任何放射性同位素随时间按负指数规律衰减，其方程式为：

$$P = P_0 e^{-\lambda t}$$

式中 P_0 为 $t = 0$ 时，自然体系形成放射性同位素的初始原子数(同位素量)；P 为经过 t 时间后剩下的未衰变的母体原子数，即

① 宇宙进化一般有4个层次：第一层次为物理进化，第二层次为天体演化，第三层次为地质演变，第四层次为化学进化。



现在母体的同位素量；λ 为母体同位素衰变常数，它的半衰期可表示为

$$t_{1/2} = \ln (2/\lambda)$$

将此式代入前式进行求解可得：

$$t = (1/\lambda) \ln (P_0/P)$$

该式即同位素测年的基本公式。原则上任何天然放射性同位素都可用来测定地质年龄。其测定计时，依据半衰期有两类计时方法①：长半衰期同位素计时法，如 U－Th－Pb 法、K－Ar 法、$^{39}Ar-^{40}Ar$ 法、Rb－Sr 法、Sm－Na 法、La－Ce 法、Lu－Hf 法、Re－Os 法等，这些方法对宇宙年代学具有重要意义；短半衰期同位素计时法，如 U 系法、沉降核类法、^{14}C 法等，这类方法均属直接测定法。此外还有依据放射性射线和裂变碎片对周围物质作用程度测年的方法，如裂变径迹法、热释光法、辐射损伤法等。

到目前为止，地质学家已测得了大量的地球岩石（矿物）的同位素年龄，各大洲大都测到了 3000Ma 以上的古老岩石，在格陵兰西部测得片麻岩的年龄为 3700Ma，美国拉布拉多片麻岩的同位素年龄为 3650Ma，明尼苏达锆石 U－Pb 年龄为 3300Ma，俄罗斯科拉半岛黑云母的年龄为 3460Ma，我国迁安科长片麻岩的年龄为 3500Ma，锆石 U－Pb 年龄为 3600Ma，澳大利亚杰克丘陵变质砾岩中碎屑锆石的 U－Pb 年龄达 4300Ma。古老岩石是地质作用初期的产物，因此地球年龄应大于上述古老岩石的地质年龄。目前国际上普遍用的即前述 46 亿 a 的地球年龄，此与月岩的同位素年龄（45 亿 a 左右），以及 20 世纪综合陨石及地球岩石 Pb 年龄（45.3＋0.03）亿 a、（47.5＋0.05）亿 a 及（45.3＋0.04）亿 a（York 和 Farquhar，1971）基本一致。一般认为，46 亿 a 前

---

① 衰变前的放射性同位素为母体，衰变过程中产生的新同位素为子体。

太阳外的星云坍缩，行星形成，地球诞生，4300Ma前地球强烈喷火，4300～3800Ma为地球胎形成的年龄，也有学者（W.B.Harland等，1989；王鸿祯等，1990）将4600～3800Ma称为冥古宙，而3800～2500Ma为太古宙。3000Ma前微观生命形成，2500～570Ma为元古宙，570～250Ma为古生代，250～65Ma为中生代；65Ma至今为新生代。

地质时代及其符号（表006－1）是国际通用的。太古宙是地史时期最早的一个时代，由美国地质学家J.D.丹纳于1872年提出，并为国际上所采用。太古宙持续时间约2100Ma，一般三分，3600（或3800）～3200Ma为古太古代，3200～2800Ma为中太古代，2800～2500Ma为新太古代。元古宙位于太古宙和古生代之间，由S.F.埃蒙斯于1887年命名，之后为国际上所采用。元古宙持续时间约1930Ma，一般三分即古元古代，中元古代和新元古代（含震旦纪）。国际地层委员会（1989）的全球地层表将古元古代划分为四个纪，自下而上（下同）为：成铁纪、层侵纪、造山纪及固结纪；中元古代划分为三个纪，即盖层纪、延展纪及狭带纪；新元古代亦划分为三个纪，即拉伸纪、成冰纪及新元古Ⅲ纪。我国的古元古代未分纪，中元古代暂划分为两个纪，即长城纪和蓟县纪；新元古代亦暂划分为两个纪，即青白口纪和震旦纪。古生代是显生宙第一个代，是以此期的古生物群显示古老面貌而命名，共有6个纪，依次为：寒武纪、奥陶纪、志留纪及泥盆纪、石炭纪及二叠纪。中生代为显生宙第二个代，以古生物群处于中古时期而得名，共有三个纪，依次为：三叠纪、侏罗纪及白垩纪。新生代是显生宙中最年轻的一个代，由美国地质学家菲利普斯创名，指这一时期的古生物与现代更接近。新生代至今仅有两个纪，即第三纪和第四纪，但第四纪并未终结。第三纪又分为老第三纪古近纪和新第三纪新近纪。新第三纪（晚期）诞生了人类祖先——早期猿人，而第四纪则是地球历史上至关重要

的时期。

表 006－1　　　　　　　地质时代表

地质时代(地层单位及符号)			同位素年龄(Ma)①		构造运动
代(界)	纪(系)	世(统)	持续时间	距今年龄	
新生代(Kz)	第四纪(Q)	全新世	0.01	0.01	喜马拉雅
		更新世	2.49	2.50	
	新第三纪(N)	上新世	2.52	5	
		中新世	19	24	
	老第三纪(E)	渐新世	13	37	
		始新世	21	58	
		古新世	7	65	
中生代(Mz)	白垩纪(K)	晚白垩世 早白垩世	72	137	燕山
	侏罗纪(J)	晚侏罗世 中侏罗世 早侏罗世	66	203	
	三叠纪(T)	晚三叠世 中三叠世 早三叠世	47	250	印支
古生代(Pz)	二叠纪(P)	晚二叠世 早二叠世	45	295	海西
	石炭纪(C)	晚石炭世 中石炭世 早石炭世	60	355	
	泥盆纪(D)	晚泥盆世 中泥盆世 早泥盆世	55	410	
	志留纪(S)	晚志留世 中志留世 早志盆世	28	438	加里东
	奥陶纪(O)	晚奥陶世 中奥陶世 早奥陶世	72	510	
	寒武纪(∈)	晚寒武世 中寒武世 早寒武世	60	570	
元古宙(Pt)	新元古代(Pt_3)		430	1000	
	中元古代(Pt_2)		800	1800	
	古元古代(Pt_1)		700	2500	五台
太古宙(Ar)			2100	4600	

① 地质学上常以 Ma 代表百万年。



地球地质年表是地质演变的时间尺度，是全球地质事件及其时间序列对比的基础数据，对地球科学的发展极其重要。

007 地球岩石的剩余磁性及地磁极性年表

地球是个大磁场，地球磁场是一个矢量。根据地磁力线特征，地球外磁场类似于偶极子磁场，即具有无限小的基本磁铁的特征（图 007－1）。这似乎表示地磁场是永久不变的，但实际上不仅磁极在不断发生摆动，而磁偏角在几十到几百年内亦大致沿纬线方向平稳地向西移动，这一性质被称作地磁场的向西偏移。地磁场漂移速率可以达到 0.18°/a 左右，绕地球一圈大致需要 1800a 的时间。

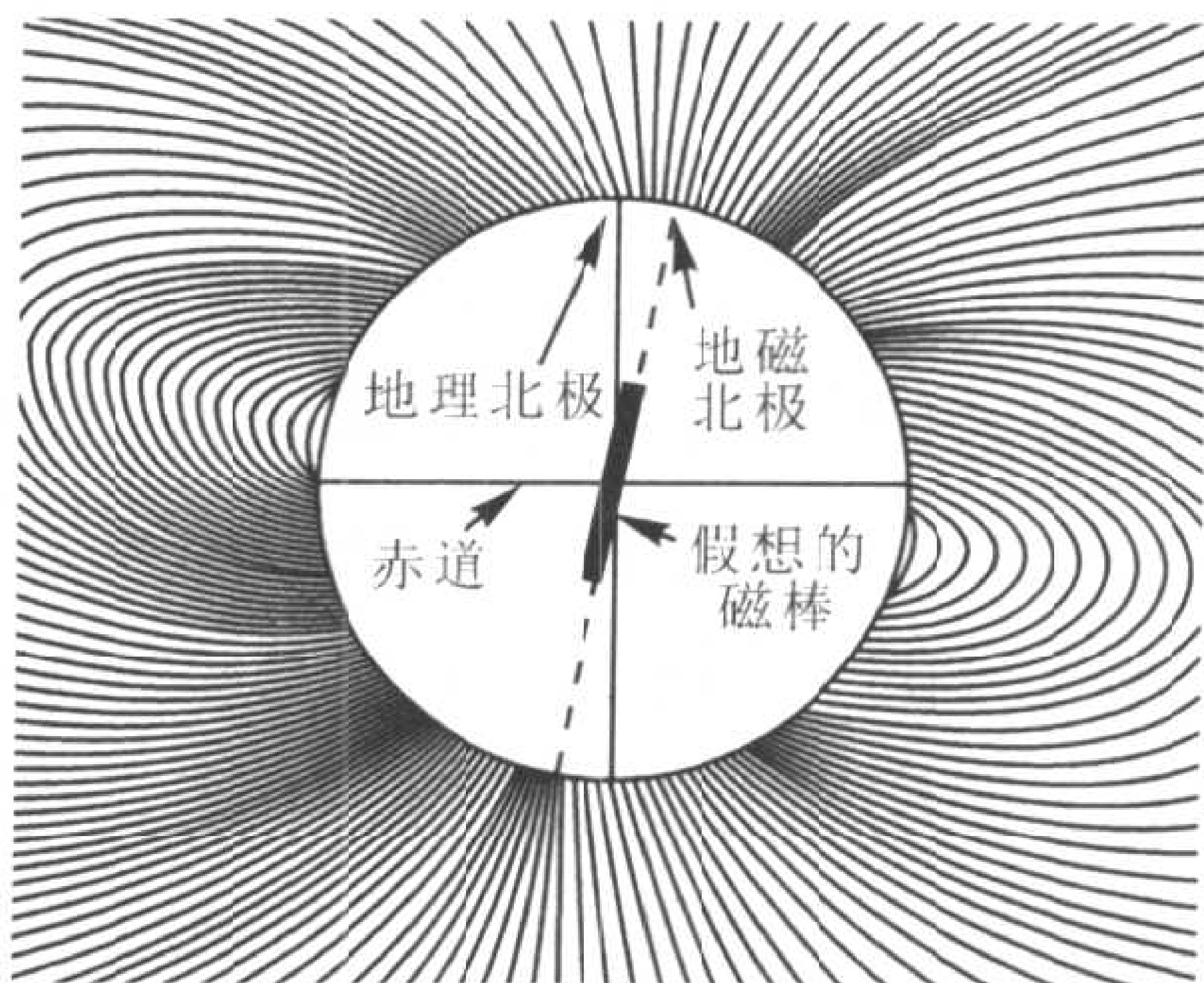


图 007－1　地球磁场图像

地磁场就好像在地球中心有一块巨大的磁铁，

地磁北极与地理北极有大约 11.5°的偏离，

地球表面的磁力线分布大致如图所示

地球磁场的存在会导致岩石发生磁化，而磁场的变化会在岩石（岩浆岩、变质岩、沉积岩），特别是在含铁磁性矿物的岩石中留下纪录，也就是说，岩石在受到外磁场作用时可获得天然剩余磁性（NRM），天然剩余磁性也称化石磁性。

岩石剩余磁性是在岩石形成过程中获得的，故磁化方向与当时的地磁方向一致。岩石剩余磁性的最主要特征是具有较高的稳定性，可一直保持到现在不变。岩石的磁化方式因岩石类型的不同而异。

火成岩(岩浆岩):火成岩的剩余磁性是岩浆在形成岩浆岩过程中,原高温岩浆逐渐冷却,当温度冷却到接近居里温度[①](700℃~500℃)或再低时,因岩浆岩中的铁磁性矿物受到当时当地地磁场作用而平行于地磁场方向被磁化,并保留所获得的磁性。这种磁化过程叫热剩余磁化,按照此种方式产生的天然剩余磁性叫热剩余磁性(TRM)。热剩余磁性强度大、稳定性高、很少受到后来地球磁场变动的影响,对古地磁研究有极为重要的意义。

沉积岩：主要是一些碎屑岩，在成岩及石化作用过程中，同样受到当时当地磁场的作用，沉积岩中的磁性颗粒便平行于地磁场的方向作定向排列而固结，这种磁化叫碎屑磁化，按照这种方式保存下来的天然剩余磁性叫碎屑剩余磁性（DRM)。同一地质时期的沉积岩所具有的这种磁性，它们的基本方向是相同的。第四系黄土和纹泥所具有的天然剩余磁性也属于碎屑磁性。还有一些沉积岩含有由化学作用所形成的铁质矿物，在成岩和石化作用过程中亦均按照地磁场方向被磁化，这种磁化叫化学磁化，由此产生的剩余磁性即化学剩余磁性（CRM)。实验研究表明，经高温化学作用生成的铁磁性微粒，在其形成大晶粒的过程中所生成的 CRM 是类似于 TRM 的稳定磁性。因此不管是 TRM、DRM 还是 CRM，只要不重新增温到居里温度以上，或者没有受到很强的交变磁场的作用，岩石的剩余磁性都不会消失。不消失的剩余磁性反映了岩石形成时的地磁场方向。依据这一特性就有可能恢复不

---

① 岩石在超过某一温度时就不再具有磁性,这一温度即居里温度,各种岩石的居里温度并不一致,一般为700℃~500℃。

同地质时期的古地磁场。

地磁场的地磁极与地理极的位置虽然并不完全重合，但从数千年以上的时间尺度看，地磁极的平均位置可以看成与地理极基本上是重合的。根据这一假定，可以把地质历史时期的古地磁极近似地当作古地理极，把古地磁场的磁子午线当作古地理经线，而古地理纬度值即经度角（φ）则可根据 $\tan\varphi = 1/2\tan I$（I 为磁倾角）求出。有了古地磁极和古纬度即可追溯古地磁场的演变了。然而 20 世纪 50 年代的古地磁测试表明，相当一批岩石的磁化方向与现在地磁场方向相反，也就是说，地磁场发生了 180°的改变，原来的磁北极转变为磁南极，磁南极变成了磁北极，这种现象被称为地磁极性反转。美国学者考克斯（A.N.Cox）等从世界各大陆采集了大量火山熔岩标本，系统地测定了它们的剩磁极性和 K－Ar 同位素年龄，提出了 450 万 a 以来的地磁极性图（图 007－2）。该图分出了 4 个主要极性期[①]，即布容正向期、松山反向期、高斯正向期和吉尔伯特反向期，每期中还有极性转向的短暂事件，比如松山反向期中的奥杜威正向事件。

由于火山喷发具有间歇性，所喷出的火山熔岩很难恰好在一种极性转向到另一种极性时被磁化，故而研究方向又转到对基本连续沉积的深海沉积物的剩余磁性测定上，也就是说，深海沉积物有可能提供连续的地磁极性转向记录，这一判断，特别是深海沉积物的反向磁化现象，终于在 1964 年被哈里森等人首先发现。1966 年，美国学者奥普代克等人又先后查明了北太平洋和大西洋的沉积岩心也都具有正反向磁化层相互交替的完整顺序。据此

① 当时把数量级为 10^6a 的极性时间称为期，以对古地磁研究做出贡献的学者的名字来命名。由于“期”（Epoch）和“事件”（Event）术语在命名时存在一些弊病，《国际地层指南》（1979）已将它们废弃，并建议把 Epoch 改用 Chron（时），把 Event 改用 Subchron（亚时）。



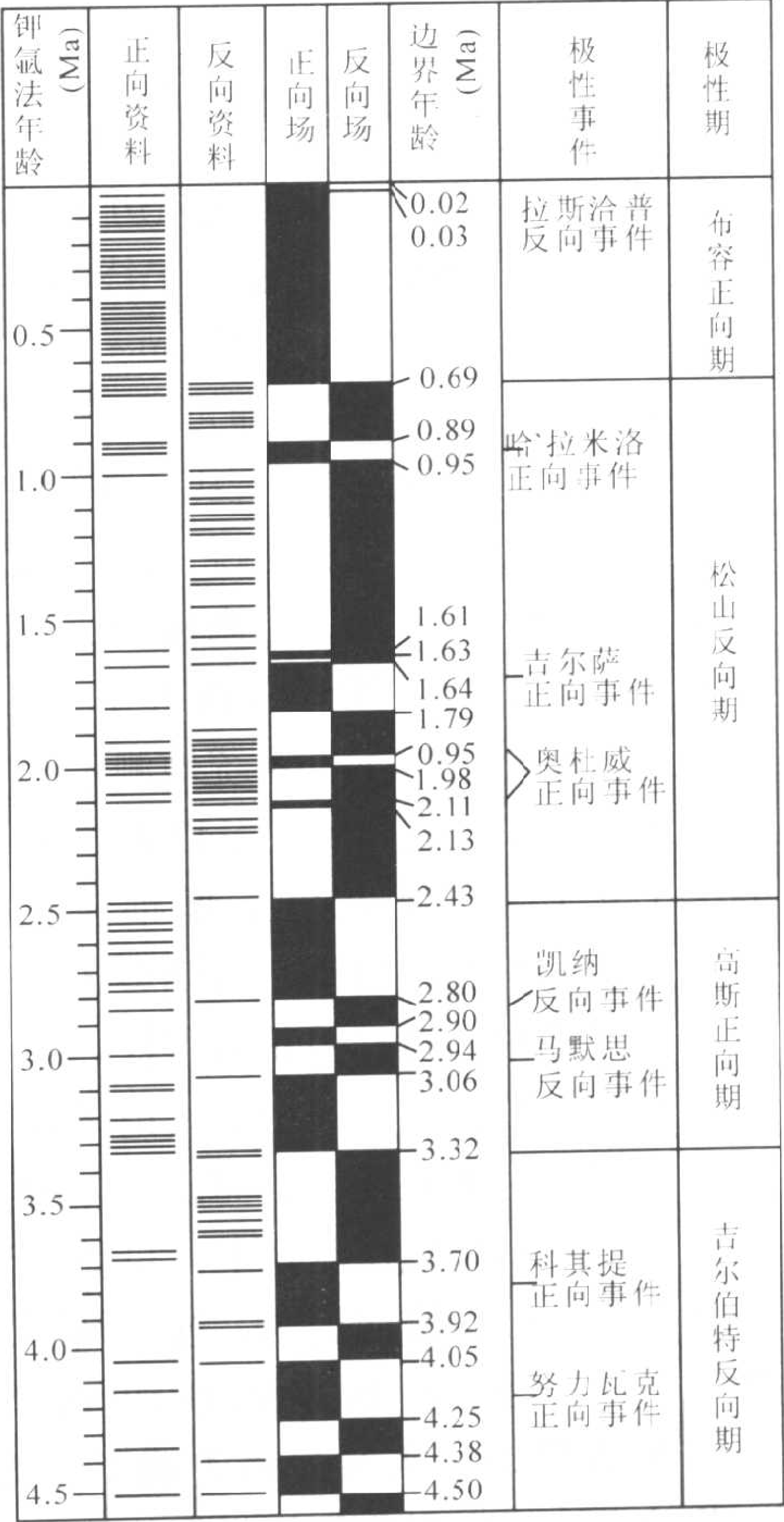


图 007－2　距今 450 万 a 的地磁极性年表

还可以确定深海沉积层的年龄。1968 年，赫茨勒等人在综合对比上述地磁异常和同位素年龄的基础上提出了晚白垩世至第四纪的地磁极性年表（图 007－3），并将表中的关键磁异常进行统一编号（1～34）。1975 年，拉尔森等又根据太平洋和北大西洋中生

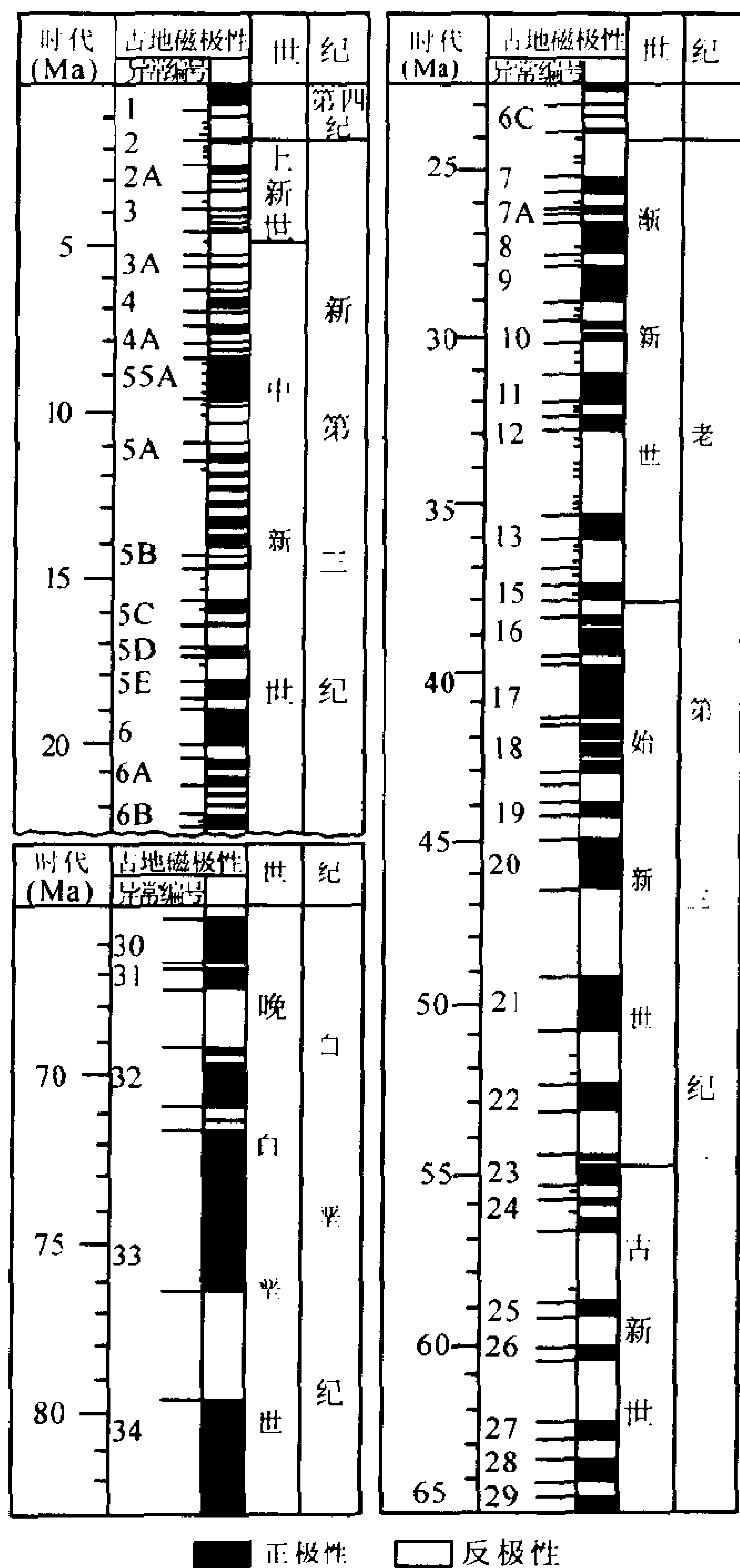


图 007－3 晚白垩世至第四纪地磁极性年表

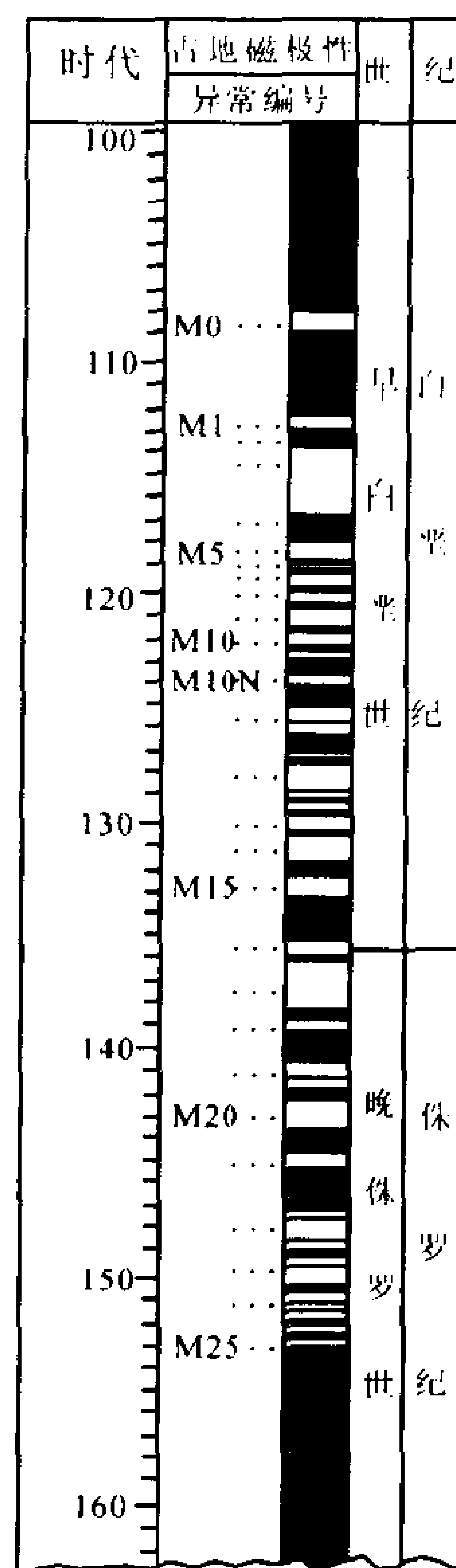


图 007－4 晚侏罗世至早白垩世地磁极性年表



代条带磁异常的研究提出了晚侏罗世至早白垩世的地磁极性年表（图007-4），并亦进行了磁异常编号（M0-M25）。由此可知，160~110Ma为漫长的正极性期，形成磁静带，而近8Ma以来则是地磁场频繁倒转的时期。

目前对于570Ma以来地质时期地磁极性的周期性转向已为科学工作者所普遍公认和接受，用超级计算机进行的数值模拟方法亦已证实。假如地球内核比液态外核转得快，经过几千年就可形成相对稳定的地磁场，而在一定时期后其极性又可以翻转。1996年，美国哥伦比亚大学的中国学者宋晓东博士等通过对地球地震波的系统研究，得出了地球内核比地幔每年转快约1.1°的结论，从而使地磁场非稳定发电机成因说得到了广泛认可。地磁极性的翻转周期，长的可达5Ma，短的仅持续3万a，每次地磁极倒转过程可持续数百年到上千年。目前地磁场的正向极性正在减弱，学者们认为可能正在向反向极性过渡。

008 地球岩石的物理性质

地球科学对地球的观测有直接和间接两种方法。通过观测地表或水下岩石露头，以及实施大陆和海洋岩心钻探属于直接观测方法。由于直接观测的地球深度（最深的钻井也不到20km）及空间范围相对有限，“入地比上天更难”，所以必须应用间接的观测方法，即地球物理的方法来帮助揭开地球内部的奥秘。用于揭开地球内部奥秘的地球物理方法主要是地震，“地震像一盏明灯，它的发生照亮了地球内部”，其次是电、磁、重力等。

地震与地震波：发端于地球内部或地下深处的地震，特别是大地震可释放出大量能量，能传遍全球，能量以地震形式传播。地震波的传播方式（图008-1）主要是体波和面波。体波的传播是三维的，面波的传播是二维的。体波又分为P波（纵波）和S波（横波）。P波类似声波，质点的振动方向与波的传播方向相



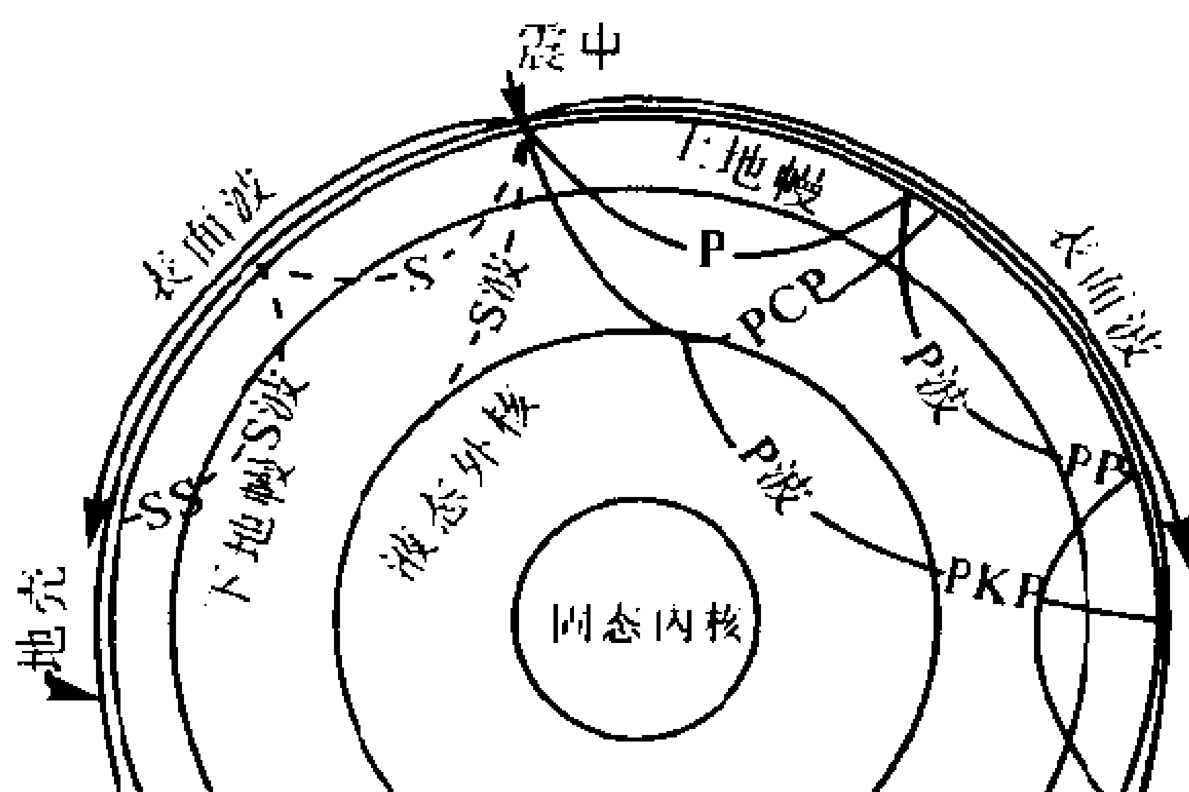


图 008－1　P 波和 S 波在地球内部的传播方式
（PP 波和 SS 波是通过地球表面反射回来的 P 波和 S 波；
PcP 波是在地核外传播的波；PKP 波是能穿透液体外核
的 P 波；S 波在地核内未发现）

同，并往返振动，振幅小，周期短，速度快；S 波类似光波，质点的振动方向与波的传播方向垂直，振幅大，周期长，速度慢。对任何物质而言，P 波的速度都大于 S 波的速度，故 P 波又称初波，S 波称次波。就地球硬岩而言，P 波是 S 波波速的 1.73 倍。P 波可以在固体、液体和气体中传播，S 波仅能在固体中传播，它们的波速公式（假设地球是弹性体）分别为：

$$V_p^2=\frac{K+(4/3)\mu}{\rho};\qquad V_s^2=\frac{\mu}{\rho}$$

式中 V_p 为 P 波波速，V_s 为 S 波波速，K 为介质的体变模量，μ 为切变模量（刚性系数），ρ 为介质密度。介质性质（介质的弹性、温度、压力、密度等）有变化，速度也随之变化。当介质是液体（气体）时，由于液体（气体）不能承受切向力，$\mu=0$，所以 S 波不存在。如果地球内部某处的波速异常低，那就可以推断该处或者是液体，或者是含裂隙流体的破碎带。面波有多种类型，其中较重要的是 R 波（瑞雷波）和 L 波（勒夫波）。面波类似投石入水激起的水波，它的能量可分布到地球的相当深度。目前透视地球内部主要靠的是 P 波和 S 波，它们的速度受岩性和压

力影响较大，受温度和岩石年龄的影响很小。V_s 对岩层部分熔融反应较明显。

重力与重力异常：重力即地球重力，它等于地球对物体的万有引力与地球自转所产生的惯性离心力的向量和。重力测量就是对重力加速度值的测定①，有绝对测量和相对测量两种，而以后者应用最广。相对重力测量，其精度已由毫伽级发展到微伽级②，可以满足各种比例尺的观测要求。小比例尺的重力测量，例如人造卫星运行中的地球重力测量，它所采集的数据，主要与地球形状和地壳深部构造有关，而大比例尺重力测量所采集的数据则主要与地壳物质的不均匀性有关。地面某点实测重力值归并到大地水准面后与该点理论重力值之间有差值，这个差值即重力异常（值）。

如果观测点高于大地水准面，因测点位置越高，实测重力值（g）比理论重力值越小③，所以必须进行高程校正（g_h），并换算到海平面上，然后再减去海平面上的重力值（g_0），其所得即自由空间重力异常 Δg_F，表达式为：

$$\Delta g_F = g - g_0 - g_h$$

在海上进行重力测量时，由于观测值几乎是海平面上的值，其表达式为：

$$\Delta g_F = \Delta g_H - r_0$$

---

① 因为离心力的最大值约为地心引力的1/300，所以重力也可粗略地看做地球引力。

② 伽（Gal）是重力单位，单位符号为 cm/s^2，$1cm/s^2$ 即 1Gal，$1Gal = 10^3mGal$（毫伽）$= 10^6\mu Gal$（微伽）。

③ 地表地形每上升1km重力值约减少0.31Gal。

式中 Δg_H 为经过零点漂移校正[①] 和厄特渥斯（Eötvös）校正[②]后，以绝对值表示的观测重力值，r_0 为正常重力值。海上自由空间重力异常能客观地反映海洋表面重力异常，它对海底地形极为敏感，从而得到广泛应用。

在陆地上测量重力时，如果既考虑到测点高度影响又考虑到岩石密度影响而进行重力校正，则称为布格校正。经布格校正后的重力异常（Δg_B）在高山区往往有较大负异常出现，这表明高山之下存在相应的质量亏损，山体的密度较小；在海洋中，由于海水密度比岩石小得多，为保持均衡，海洋下面的岩石不仅密度较高，而且应向上凸出，即从地下某一深度算起，相同截面所承载的表面岩石柱体的总质量应趋于相等，这一概念称为重力均衡。以重力均衡对布格异常所做的进一步校正即为均衡校正。经过均衡校正就得到均衡重力异常（Δg_i），如果某处 Δg_i 为零或接近零，则表明该处地壳基本处于均衡状态；如果 Δg_i 为正，则说明存在质量亏损，意味着该区正在隆升，当有更多的物质加入此区；如果 Δg_i 为负，则说明存在质量盈余，浅部岩石过多地补偿了地形的隆起，意味着该区正在沉降，可接受更多的沉积物。

重力对地球的演化起到趋向平衡与稳定的作用，但同时又会在趋向均衡过程中造成地球圈层间或圈层内部的相互作用。

在这里需要进一步指出的是重力均衡问题。英国人普拉特（Pratt）认为，地壳较高部分是由于它们具有较低密度而受到抬

---

① 零点漂移校正即消除重力仪零点位移（重力仪归零后所出现的读数差）的校正。

② 在海洋船上进行重力测量时，由于仪器相对于地球表面在运动，当船向东航行时，船速增大了作用在重力仪上的地球自转向心加速度，而向西航行时则相反，也就是说，重力加速度发生了变化，所以需要做相对速度校正，这一校正即为厄特渥斯校正。

升的结果（密度补偿模式）；而艾利（Aivy）则认为，地球表层各处的物质组成是相同的，地壳和下伏地幔的关系如同木块浮在水面上那样，一般而言，如果某山系显示出较高的高程，则其地下的“山根”也更深。艾利的这一“深度补偿模式”与许多山系的地震测深相一致，即大陆地壳与大洋地壳下插深度相比，要远远大于大陆与洋底之间的高程差。但现代研究表明，实际地壳均衡补偿是深度和密度补偿模式按一定比例共同作用的结果，深度补偿约占63%，密度补偿约占37%。

流变性：地球岩石受力时发生缓慢的变形（流变），称为蠕动或蠕变。蠕变随受力时间的增加而增加，蠕动的快慢用应变率（蠕变速率）$d\epsilon/dt$ 表示。当物体变形固定后，内部应力会随时间逐渐衰减，这种现象称为松弛或张弛。岩石的流变性目前仍借用流体力学中的粘滞性 η 来表示，η 定义为牛顿流体[①] 内切应力与应变率的比值。η 随温度升高而降低，随围压升高而加大，并与岩石部分熔融关系密切。在高温下岩石首先在其矿物颗粒边缘塑性化，其后局部熔融，并逐渐发展成为塑性流网络，然后发生蠕变。蠕变可分为三个阶段：阶段Ⅰ的特点是曲线上凸，蠕变速率随时间减少，如在此阶段卸载（去压），其弹性变形一部分即刻恢复，另一部分则逐渐恢复（D→F），不存在永久变形；阶段Ⅱ为稳定蠕变，如在此阶段卸载，其弹性变形开始下降，然后缓慢降到某一点，即存在永久变形；阶段Ⅲ为加速蠕变阶段，曲线上升，蠕变速率增加，并最后导致破坏。这种典型的三阶段蠕变会在一定温度和压力下出现。地球上地壳以下岩石转变韧性时应符合这一规律。

介质品质因素：即 Q 值，无量纲。它是一个周期（或一个长距离）内振动所消耗的能量 ΔE 与总能量 E 之比的倒数，即

---

① 牛顿流体指应力增加时应变不太大的流体。

$1/Q=\Delta E/2\pi E$。Q^{-1}与单位周期内地震波能量耗散成正比。Q值与压力、温度、岩石类型及其熔融状态关系密切。对于一定的介质，不同的波有不同的 Q 值。岩石圈的 Q_S（S 波 Q 值）及 Q_P（P 波 Q 值）均较高，而软流圈相对均较低。

009 地球的物质组成：元素、矿物及岩石

按照宇宙始于大爆炸的理论，物质都是宇宙大爆炸时的基本粒子（反粒子）聚变成氢，氢合成氦，氦再进一步合成其他元素的结果，也就是说，宇宙大爆炸产生了两个丰度最大的核素^{1}H和^{4}He，以及少量的^{2}H、^{3}He和^{7}Li，而大多数核素则是在恒星内部的核过程中产生的，核合成类型与恒星演化过程密切相关。这一元素在恒星中合成的假说即 B_2FH 理论（E.M.Burbidge，1957），它较好地解释了宇宙—太阳（系）—地球元素的丰度特征。

根据 20 世纪以来不同学者所计算的宇宙—太阳（系）—地球，以及地球各主要圈层的元素含量，可知：宇宙中（H + He）占 98.1%；太阳系中的（H + He）占 97.0%；地球中（Fe + O + Si + Mg + Ni + Al + S）占 98.1%，其中 Fe 和 Ni 大部分以金属状态存在于地核中，而地壳和地幔的组成则以 O 和 Si 为主，Al、Mg、Fe 次之，在地球的水圈中以 O 和 H 为主，生物圈则主要为 C、H、O 和 N。大气圈、水圈和生物圈中所有元素的质量和虽不及地球总质量的 0.1%，但它们都是地球物质最为活跃的组分，对人类、对生命的影响较大。

固体地球中的元素大部分以化合物或以单质形式即以矿物的形式聚集在岩石中。所谓矿物即呈天然产出（地球物理化学作用的结果），具有一定化学成分和有序原子排列，并通常由无机作用所形成的均匀的无机晶质固体（有极少数为非晶质和胶体），矿物不论出现在地球的什么部位，其化学成分都是一致的。除少数矿物为气态或液态（如自然汞）外，绝大多数都是以稳定的固

体形式而存在。目前已知矿物有3000多种，其中常见的有100余种，而最常见的造岩矿物只有10余种。按其化学成分和晶体结构[①]可区分为五大类。

自然元素矿物：指自然界以单质状态产出的矿物，这类矿物已知有90多种（约占地壳总重量的0.1%），主要为金属元素，如铜（Cu）、银（Ag）、金（Au）、铂（Pt）、砷（As）、铋（Bi）、汞（Hg）、金刚石（C）、石墨（C）及硫（S）等。

硫化物矿物：即金属元素与硫的化合物，种类繁多，已知有200余种（约占地壳总重量的0.75%），主要有辉铜矿（Cu_2S）、方铅矿（PbS）、闪锌矿（ZnS）、黄铜矿（$CuFeS_2$）、黄铁矿（FeS_2）、磁黄铁矿（$Fe_{1-x}S$）、雄黄（AsS）、雌黄（As_2S_3）、辉锑矿（Sb_2S_3）、辉钼矿（MoS）等。

卤化物矿物：为HF、HCl、HBr、HI酸所形成的盐，最主要的阳离子是K、Na、Ca、Mg等轻金属元素。这类矿物主要有萤石（CaF_2）、食盐（NaCl）、钾盐（KCl）等。

氧化物和氢氧化物：包括金属和非金属的氧化物类和氢氧化合物类矿物，已知有200多种（约占地壳总重量的17%），是Fe、Cr、Mn、Al、Ti、Sn、Nb、Ta、U、REE[②]等的重要矿石矿物。

含氧酸盐矿物：是地壳上分布最广最多的一类，约占已知矿物总量的2/3。依据阴离子团的不同可分成八类：硫酸盐类、碳酸盐类、硅酸盐类及硼酸盐类、磷酸盐类（钒酸盐类）、钨酸盐类（钼酸盐类）、铬酸盐类、硝酸盐类。以前三类最为重要。

---

① 晶体结构即晶体内部结构，其基本特征是晶体结构中的质点在三维空间的周期性平移重复。

② 即稀土元素，指元素周期镧系元素加钇（Y）共16个元素。也有学者将钪（Sc）归为稀土元素的。

矿物在地球各圈层虽有广泛分布，但总是以矿物集合体——岩石的形式而存在。岩石是由一种或一种以上矿物或岩屑组成的有规律的集合体，也就是说，岩石是地球物质组成的总体。依岩石成因可分为三大类：火成岩、沉积岩和变质岩。

火成岩：又称岩浆岩，指岩浆在地下或喷出地表冷凝形成的岩石。火成岩的种类很多，已知1000多种，按岩石化学成分一般可划分为五大类：超基性岩，SiO_2 含量小于45%，如橄榄岩、苦橄岩；基性岩，SiO_2 含量为45%～52%，如辉长岩、玄武岩；中性岩，SiO_2 含量为52%～65%，如闪长岩、安山岩；酸性岩，SiO_2 含量大于65%，如花岗岩、流纹岩；碱性岩为（Na_2O+K_2O）与 Al_2O_3 和 SiO_2 分子数比值大于1:1:6的岩石，同时岩石中必须含似长石和（或）钠质辉石和（或）钠质角闪石。如果考虑到火成岩（Na_2O+K_2O）含量及其与其他氧化物的分子数关系，又可将火成岩划分为三种类型：正常型（钙碱性型），$CaO+Na_2O+K_2O>Al_2O_3>Na_2O+K_2O$；碱过饱和型（碱性型），$Na_2O+K_2O>Al_2O_3$；铝过饱和型（铝性型），$Al_2O_3>CaO+Na_2O+K_2O$。

沉积岩：又称水成岩，为成层堆积的松散堆积物固结而成的岩石。沉积岩在岩石圈虽然所占重量份额较小，但在陆地表面分布极广（按面积约占75%），因此常受到人们的关注。按成因及造岩组分以及结构构造可分为：1. 碎屑岩，包括砾岩（角砾岩）、砂岩、粉砂岩和泥质岩（粘土岩、泥岩、页岩）；2. 碳酸盐岩（石灰岩、白云岩）；3. 化学或生物化学岩（硅质岩、铁质岩、磷质岩、蒸发岩及可燃有机岩）。此外还有一些特殊沉积岩，如风暴岩、浊积岩等。

变质岩：指变质作用形成的岩石。习惯上把变质岩分为下列岩类：1. 区域变质岩类，由区域变质作用所形成，如板岩、千枚岩、片岩、片麻岩、混合岩；2. 热接触变质岩类，如角岩等；

3. 接触交代变质岩类，如夕卡岩；4. 动力变质岩类，如糜棱岩等；5. 气液变质岩类，如云英岩等；6. 冲击变质岩类，如冲击岩等。

10 地球化学元素丰度及地球化学分类

元素丰度是指化学元素在一定自然体系中的相对平均含量。按照不同自然体系计算出来的元素丰度有地球元素丰度、太阳系元素丰度和宇宙元素丰度，以及地壳元素丰度等。元素丰度常用三种单位表示，即重量单位（重量丰度）、原子单位（原子丰度）和相对原子单位（相对丰度），其中重量丰度是最基本的数据，原子丰度和相对丰度都可根据重量丰度数据换算求出。

设任一元素在地球中的质量为 Q，地球的总质量为 M，则元素的地球丰度 $A = Q/M$，A 为元素的平均相对含量，即重量丰度。由于各元素在地球中的含量高低差别较大，故采用的重量级序亦不相同，计有三种：1. 重量百分数（重量 $W_B\%$），主要用于表示常量元素的丰度；2. g/t，即以百万分之一（10^{-6}）的重量表示微量元素的丰度（ppm）；3. mg/t，即以十亿分之一（10^{-9}）的重量表示超微量元素的丰度（ppb）。地球元素丰度一般应列出化学元素从原子序数为1的氢（H）到原子序数为92的铀（U），但某些含量很低而又难以精确测定的地球元素丰度目前尚不能算出。

自20世纪20年代以来，不少学者都计算过地球元素丰度，但计算方法不同，归纳起来主要有三种，即陨石类比法（A法）、地球模型—陨石相类比法（M法）及地球物理类比法（L法）。A法采用球粒陨石元素平均含量代表地球元素丰度（现已不采用）。M法采用陨石相分析，即以硅酸盐相、金属相和陨石硫铁相的分析资料为基础来计算地球主要元素的平均含量，故该法又称SMT法。马逊（B.Mason，1982）以SMT法所计算出的地球主要元素



丰度列如表 010-1。L 法由我国学者黎彤（1976）所创用，他采用布伦（Bullen）的固体地球模型，将地球圈层划分为地壳（A）、上地幔（B+C）、下地幔（D）和地核（E+F+G）4 大圈层，各圈层的质量数分别为 0.4%、27.7%、30.4% 及 31.5%。先求出各圈层的元素丰度，然后用圈层质量加权平均求出整个地球的元素丰度，可知：重量占地球 90% 的元素是 4 个，即 Fe、O、Mg、Si；在 1% 以上的元素也是 4 个，即 Ni、Ca、Al、S。其他 84 个元素之和，重量仅 1% 左右。地球 10 个主要元素的重量丰度序次为：Fe > O > Si > Mg > Ni > S > Ca > Al > Na > Co。原子丰度特点是 O 和 S（主要阴离子）的原子丰度远小于全部金属阳离子原子丰度之和，因而能有多余的 Fe、Ni 进入地核。

表 010-1　SMT 法求得的地球主要元素成分及平均含量

元　素	$W_B\%$			
	金属相（M）	硫化物相（T）	硅酸盐相（S）	合　计
Fe	24.58	3.37	6.68	34.63
Ni	2.39			2.39
Co	0.13			0.13
S		1.93		1.93
O			29.53	29.53
Si			15.2	15.2
Mg			12.7	12.7
Ca			1.13	1.13
Al			1.09	1.09
Na			0.57	0.57
Cr			0.26	0.26
Mn			0.22	0.22
P			0.10	0.10
K			0.07	0.07
Ti			0.05	0.05
总计	27.10	5.30	67.60	100.00

地球元素丰度与太阳大气层元素丰度对比表明：1. 二者的金属元素丰度与各自硅原子比值，基本上是保持一致的，并没有因为太阳大气层和地球中金属元素的赋存状态不同而产生较大差异，也没有因为46亿a以来太阳和地球各自经历完全不同的演化历程而发生变异；2. 地球与太阳大气层中的惰性元素丰度相比普遍大幅度下降，在丰度对原子序数曲线上为低谷，表明地球元素中亏损惰性元素，可能的原因是，惰性元素的化学稳定性较高，而不易与其他元素一起进入地球原始物质之故。

上述地球元素在公元前就被人类认识的仅有 Au、Ag、Pb、Sn、Hg、Cu、Fe 和 C 及 S；公元前至 17 世纪末认识的主要是 As、Sb(古代)、Pt 和 P 等元素；18 世纪产业革命兴起，生产迅速发展，发现了一大批化学元素，有 H、N、Ti、Cr、Mo、Te、W、U、Mn、Cl、Co、Be、Br、F、O、Ni、Zn、Zr 等 18 种元素；19 世纪发现的元素最多，有 50 种，至此周期表上尚未发现的元素已为数不多；20 世纪又发现了几种较难发现的元素，如 Rn(氡)、En(铕)、Hf(铪)、Lu(镥)、Re(铼)等，20 世纪 40 年代甚至连没有稳定同位素的 Tc(锝)及 Fm(镄)亦被发现，至 20 世纪 80 年代末(1989)Ac(锕)最终被发现，则地球上所有天然元素皆被发现。从元素发现年代及发现者的统计表(C.W.Correns，1969；牟保磊，1999)中得知，除古代无名氏发现的元素外，其他地球天然元素的发现者中无中国科学家的发现。

地球元素的自然分类即元素周期表，但对于地球科学来说，还需结合元素的自然组合及地球化学特性作进一步的分类，这就是直到现在还被科学界广为采用的戈氏(V.M. 戈尔德施密特)分类。戈氏基于原子结构、原子容积、顺磁性、逆磁性、铁磁性[①]，按

① 顺磁性，即未成对电子的磁性；成对电子诱导产生的磁性为逆磁性(或抗磁性)；铁磁性是指金属或合金具有磁畴，在外加磁场或机械力作用下可使磁畴有序化(磁化)。

不同元素的化学亲和力（主要是 O 和 S），以及元素在陨石及地球各圈层中的分布特征把元素划分成亲气、亲生物、亲石、亲铜、亲铁元素五大类。

亲气元素：主要存在于大气圈中，H、N、He、Ne、Ar、Kr、Xe、Rn 属此类。

亲生物元素：主要富集在生物圈有生命的动植物内，包括 C、H、O、N、P、S、Cl、I，以及 B、Ca、Mg、K、Na、V、Mn、Fe、Cu。

亲石元素：又称亲氧元素。亲石元素较多，包括 Li、Be、B、C、O、F、Na、Mg、Al、Si、P、Cl、K、Ca、Sc、Ti、V、Cr、Mn、Br、Rb、Sr、Y、Zr、Hf、Nb、Ta、Cs、Ba、I、W、At、Fr、Ra、Ac、Th、Pa、U 以及镧系元素。

亲铜元素：又称亲硫元素。亲铜元素共包括 18 个元素：S、Cu、Zn、Ga、Ge、As、Se、Ag、Cd、In、Sn、Sb、Te、Hg、Tl、Pb、Bi、Po（钋）。

亲铁元素：主要集中于 Fe - Ni 相的地核中。亲铁元素共包括 12 个元素：Fe、Co、Ni、Mo、Rn（钌）、Rh（铑）、Pd（钯）、Os（锇）、Ir（铱）、Pt（铂）、Au、Re（铼）。

地球的内部圈层结构

对地球内部圈层结构的认识主要来自天然地震纵波（P 波）及横波（S 波）的反射和折射研究，其确定依据主要是地震波速随深度的变化。表 011 - 1 列出了地球内部各圈层的主要间断面深度及波速变化，表 011 - 2 列出了各圈层的体积及质量分配以及对压力、密度和温度的估计值。从地震波传播速度变化可知，地球内部存在着 7 个显著的地震波速不连续面（间断面），其中最主要的不连续面有三个，即莫霍洛维奇面（简称 Moho 面）、古登堡面及莱曼面。



表 011－1　　地球内部圈层分层简表

圈层	布伦分层	深度(km)	不连续面(深度 km)	波速(km/s)变化
地壳(不均一)	A	(0)	C 间断面(8～12)	波速自上而下递增
		36 (15～70)	Moho 面	V_P 由 6.8～7.2 突变为 8.0～8.2
上地幔(不均一)	B		(大洋下 6～10；大陆下 30～50)可细分为 B′，B″，B‴；B″为低速层(150～250km)，B′为盖层	30～100km V_P 递增，100～150km 低速层，V_S 衰减明显 低速层以下 V_P 随深度递增
		400 (410)	20°间断面	速度梯度带
过渡带(转换带)	C		(Byerly 间断面)	波速随深度增加，但变化速度不均匀
		670 (650)	MB 670	速度梯度带
下地幔(可能均一)	D		(过渡带与下地幔间断面)	波速随深度增加，速度均匀
		2900 (2891)	古登堡面	V_P 由 13.7 突减为 7.98 V_S 中断
外核(均匀液体)	E		(GW 面)	V_P 由 8.0 缓增加 10.44；V_S 中断
		5100 (5155)	莱曼面	V_P 递减后陡增，V_S 始现
(过渡层)	(F)			
内核(固态不均一)	G	6371	可细分为 G′，G″和 G‴；G″为过渡层(F)，自内核表面至核心 200～250km 处	V_P 由 10.44 递增至 11.24；V_S 开始出现(估计 V_S 为 3.0～3.7)

表 011-2　　地球各圈层主要物理参数

圈层	密度 (g/cm^3)	压力 (GPa)	体积分配 (%)	质量分配 (%)	占地球质量 (%)	占(地壳+地幔)质量(%)
地壳(A)	2.84	0.00~0.9	1.5	0.8	0.00374	0.00554*
上地幔(B)	3.31~3.52	0.9~13	16.0	9.8	0.103	0.153
过渡带(C)	3.56~4.44	13~40	22.0	17.0	0.075	0.111
下地幔(D)	5.42~5.62	40~137	44.3	41.0	0.492	0.729
外核(E)	8.89~12.26	137~329	15.4	31.4	0.308	
内核(G)	12.7~13.0	329~367	0.8		0.017	

注：① * 指陆壳或洋壳所占比例，分别为 0.00099%（占地球）及 0.00147%（占地壳+地幔）；②温度分配，陆壳为 600℃~800℃，洋壳为 150℃~200℃，核幔边界不超过 4000℃，地心不超过 6000℃；③上地幔 80km 以下地热梯度随深度增加而减小；④整个地球的平均密度为 $5.52g/cm^3$，体积为 $10.8759\times10^{20}m^3$，质量为 $59.820\times10^{23}kg$。

莫霍面是由克罗地亚学者 A.Mohororičić于 1909 年发现的。在莫霍面上下，V_p 从约 7.0km/s 迅速跳跃到 8.1km/s 左右；V_s 则从约 4.2km/s 增加到 4.4km/s 左右。莫霍面出现的深度全球平均为 36km，在大洋之下平均约 6km。莫霍面现已被公认为壳幔边界，即莫霍面之上为地壳（$h<36km$），莫霍面与古登堡面之间为地幔（$36km<h<2891km$）。

古登堡面简称 GW 面，是由美籍德裔学者 B.Gutenberg 于 1914 年发现的。在古登堡面上下，V_p 由 13.6km/s 急剧下降到 7.98km/s，V_s 从 7.23km/s 突然消失，即 $V_s\rightarrow0$。古登堡面出现的深度约为 2891km（简记为 2900km）。古登堡面现已被公认为核幔界面，即此界面之下为地核。

莱曼面是由丹麦女地震学家莱曼（I.Lehmann）于 1936 年从微弱的 P 波解析中发现的。在莱曼面上下，V_p 从 10.3km/s 增至

11.2km/s，V_s 从趋于零增至 3.5km/s。莱曼面出现的深度为 5155km（简记为 5100km），被认为是外地核与内地核之间的界面。在此面以上的外核不能传播 S 波（液态），而之下的内核虽能传播 S 波，但 V_s 较低，表明它接近熔点或部分呈熔融状态。至此地球内部的三个主要圈层——地壳、地幔和地核，以及地核的液态外核和固态内核都已基本被肯定。莱曼面发现 30 年之后（1967）澳大利亚的学者布伦（K.E.Bullen）又依据当时的地震资料提出了地球内部结构的 A 模型，这就是目前广泛应用的 A、B、C、D、E、F、G 分层模型。

关于上述地球内部各不连续面的性质，目前多数学者倾向于壳—幔—核之间的界面可能主要是化学界面，而壳—幔—核内部的界面可能主要是物理界面。

上述地球内部的壳—幔—核结构模型已为国际地球标准模型委员会（1980）推荐为参考地球模型（REM），自外而内依次为地壳—地幔—外核—内核。地球内部各圈层的运动速度都不相同。

地壳是地球的最外层，地壳厚度在稳定大陆区为 30～35km，在一些造山带可厚达 60～80km，平均厚度为 36km（海洋地壳均厚只 6km）。地壳的质量约 2.6×10^{25} g（占地球总质量的 0.434%）。地壳主要由低密度的富铝硅酸盐岩石组成。对地球演化起着主要作用的 K、U、Tn 等元素，在地壳中的量约占地球总含量的 56%。地壳温度，在正常稳定大陆地壳下为 400℃～600℃，达不到岩石熔点（1200℃～1350℃），故地壳岩石处于固相刚性状态。地幔是地球的主体部分，可分为上地幔和下地幔，莫霍面到 670km 深处为上地幔。上地幔结构不均一，间夹多层厚薄不一的低速层。软流圈即位于上地幔中上部。670～2900km 为下地幔，比较均一，组成物质主要为中等密度固态富镁铁硅酸盐岩石，含有少量金属硫化物或氧化物流体。下地幔的成分，学者

们估计近似于（$0.49MgO + 0.12FeO + 0.39SiO_2$），但也有别的估计。在2900km以下为地核，外核半径为2891km，内核半径为1200km。地核的物质组成，20世纪前期的主流观点为地核是由于重力和化学分异形成的高密度的铁镍合金，外核呈液态，内核呈固态。近来的另类观点为，地核是由原始太阳系星云吸积形成的铁与硅、氧、碳、硫等轻元素合金所组成，可能的模型为FeS－Fe或Si－Fe模型。

此外，近年来通过计算发现，地核、地幔的硅酸盐与铁的比例，居然与来自地球外的球粒陨石（约占陨石总量的80%）的硅酸盐与铁的比例近似，这似乎说明幔—核原来很可能是由球粒陨石类物质分异而成的，在地球形成后不久就形成了。

四、地球的外部圈层结构

地球外部圈层一般划分为大气圈、水圈和生物圈三个圈层。然而由于地球外部圈层是人类赖以生存的地球环境，与人类以及其他生物的繁衍生息关系密切，所以，也有学者认为地球外部圈层还应包括土壤圈和智能圈或人类圈（Noosphere）。

1.大气圈：大气圈即地球外部的气体包裹层，它是地球与宇宙物质相互交换的前沿。根据大气圈在不同高度上的温度变化，通常将其划分为5层，自下而上为：对流层、平流层、中间层、热层（电离层）及逸散层。逸散层再向外即为太阳上层大气（相对太阳）。太阳上层大气是太阳活动爆发的区域。太阳活动对地球空间的影响主要是通过太阳上层大气的电磁辐射和粒子辐射来实现的。

对流层：位于大气圈的最下层，是稠密的大气层，其质量占整个大气圈质量的75%，有强烈的垂直对流和水平运动。对流层的厚度为12km，赤道上可达17km，两极为10km；大气温度随高度（相对地表）增高而下降，靠近海平面约15℃，靠近对流

层顶部约 -50℃，平均递减率为 -6.5℃/km。对流层中水气和尘埃含量较高，雷电、雨雪、云雾、霜雹、寒潮、热浪等天气现象与过程也都发生在这一层。通常所说的大气污染就是对该层而言的，尤其在 1~2km 高度范围内，可见对流层对人类生存与活动的影响是很大的。

平流层：也叫同温层，位于对流层顶至 50~55km 的高度，约占大气圈质量的 25%。在平流层中，气温总体上是随高度增加而升高，温度从底部的 -80℃以下迅速升至 0℃左右。主要原因是平流层含臭氧较多（占地球总量的 90%），臭氧能吸收太阳光中的超短波部分（紫外线），另外地表辐射影响在减小。这种温度结构抑制了大气的垂直运动，而以水平运动为主。由于平流层水气和尘埃含量又极少，所以当飞机进入平流层飞行时，尽管对流层电闪雷鸣、风雨交加，但平流层总是晴空万里，可平稳飞行。

中间层：位于平流层顶到大约 80km 的高度，温度再次随高度增加而下降，至中间层顶达到最低值（-83℃左右），是大气圈中最冷的一层。中间层再次出现显著的空气垂直对流运动，只是因为这里空气太稀薄，又缺少水蒸气，所以形不成风和雨。由于在中间层中约 60km 的高度，大气分子开始电离，所以 60~80km 高度为均质层与非均质层之间的过渡层。

热层：又称暖层、增温层或电离层。温度随高度增加急剧上升，到约 100km 高度时，白天温度可达 1000~1700K。热层空气分子在各种射线作用下大都发生电离，成为原子、离子和自由电子，电离层之名因此而得。电离层对无线电波的传播至关重要，当地球表面无线电波发射出去后，遇到电离层就会反射回地面，如此多次反复就能传到很远的地方。

散逸层：也称外逸层，是大气圈的最外层（外大气层），延伸高度大约为 800km。由于外逸层温度高，大气极其稀薄，地心



引力微弱，所以运动速度较快的质点可以摆脱地球引力而逸入宇宙空间。

2. 水圈：地球海洋和陆地上的液态水和固态水构成的一个大体连续的覆盖在地球表面的圈层，称为水圈，包括江河湖水、海水、土壤水、浅层和深层地下水，以及南北极冰帽和大陆高山冰川中的冰，还包括大气圈中的水蒸气和水滴。

地球上的水按其质量计算，97.3%为液态，它淹没了地球表面的70.8%(海洋)；2.1%的水为冻结在两极和高山冰川的冰，其余不到1%的水在地面流动或渗透在岩石、土壤、生物及大气中(表012－1)。大气中的水是全球水循环中的一个重要环节。

表012－1　　　　地球水分布表

水类型	水体和水	水量（$\times 10^{13}m^3$）	所占比例（%）
海洋	海洋水	134 990	97.2725
陆表	河流水	0.125	0.0001
陆表	淡水湖	12.5	0.0090
陆表	咸水湖	10.4	0.0075
陆表	冰川	2920	2.1041
地下	土壤水	6.7	0.0048
地下	浅层地下水	420	0.3025
地下	深层地下水	414	0.2984
生物	生物水	0.12	0.0001
大气	大气水	1.3	0.0010
地　球　总　计		138 775.145	100

水是一种神奇的物质，研究发现，大多数生物体内水的重量占生物体重2/3以上，人和其他动物的形体与重量都主要靠水维持；研究还发现，人体血液的矿化度为9g/L，与30亿年前的海水矿化

度是相同的。当今医疗静脉点滴用生理盐水的浓度即0.9%的NaCl溶液,与原始海水一致,这似乎表明,现代人身体内仍流动着几十亿年前的海洋水。在植物体内,水分含量更高,可达90%,这一切都表明地球生命的产生和进化都离不开水。

3. 生物圈:生物圈是指地球大气圈、水圈、岩石圈有生命的部分,即地球上所有生物(包括人类)生活和与之相互作用的地球环境总体,其上限可达海平面以上12000m,下限可达海平面以下15000m,可见生物圈是一个范围广阔、生物多样、结构精巧、关系复杂、形态特殊的物质体系。在某些极端情况下,例如在大气圈对流层9km以上高度,干旱荒漠的严寒(-190℃)和酷热(140℃)环境中仍能找到真菌的孢子,在平流层22km高度也曾发现有细菌和真菌。岩石圈中最深的生命极限可达到地下2500~3000m处(石油细菌),在11000m的海洋底部仍然有生物存在。据此,学者们认为,除了生机勃勃的生物圈外,还应存在一个界限不甚明确,有着某些休眠形式生命的“副生物圈”。

生物圈的发育经历了大约30多亿a的历程。大约在38亿a前,地球有了适宜生命发生的环境,首先在水体中出现了生命活动,至20亿a前出现了能进行光合作用的固氮生物,释放出氧气,并在16亿a前形成了含氧气的大气圈,至7亿a前出现了多细胞生物,至5亿a前出现了无脊椎动物,大约在4.5亿a前,生命活动从海洋扩展到陆地,形成笼罩全球的生物圈,之后在约2亿a前出现了哺乳动物,在二三百万年前出现了人类。人类的出现是生物进化达到高级阶段的标志。生物圈中每个生物都是一个系统,它们又组成相互联系的一个大系统,即生态系统。人类作为生态系统的高级生物,和其他异养有机体的生命一样都是依赖绿色植物而生存的。目前关于生物圈的认识和研究已广泛开展,最著名的是人与生物圈计划(MAB)、国际地圈生物圈计划(JGBP)。地球,这个宇宙中已知最大的生物圈生态系统,将成

为包括人类在内的地球生物的大家庭。

013 地球系统与固体地球系统

地球是巨系统。研究地球巨系统就是要从整体论高度来研究地球系统内各个子系统，即内外圈层内部及圈层之间运动变化的全过程，以及形成机制及可能发生的变化。发生于地球系统中的各种时间尺度的地球环境变化都是地球各分量（子系统）三大基本过程（物理、化学、生物学过程）相互作用的结果。这是一种更广阔、更全面的地球观，是与当今社会经济发展、人类进化以及技术上的可实现性密切相关的新地球观。

现今的地球系统可以看做是由固体地球子系统、气水地球子系统及月球子系统三个子系统所组成（杨文采，1999）①，其中气水子系统仅包括地球外部圈层的气圈和水圈，不包括生物圈，因为生物圈是独特的高级系统。生物活动，特别是人类活动是引发地球系统变化的驱动力之一。月球子系统，虽与地球另外两个子系统相互并列，但相对于其他两个子系统，主要是与固体地球子系统相比，发育不够健全。不过就整个地球系统而言，没有月球子系统，地球就不可能成为一个“家族式”的高级星球。因为这种“家族式”结构与氢原子类似，属于自然界中普遍存在的稳定（子）系统结构。

固体地球子系统传统上包括壳—幔—核三大圈层，但近20年来有关地球动力学的大量观测资料表明，地球的壳—幔—核圈层，它们的边界是很复杂的，横向上也有明显变化，这是其一；其二，这种壳—幔—核三圈层行星结构，是行星（包括地球）老化（阶段）的标志，不宜作为固体地球系统的组成要素，也难以

① 也有学者认为，地球的子系统包括地核、地幔、地壳、水圈、冰冻圈、生物圈和大气圈。

完全反映现代地质作用过程，所以从地球内部相对运动单元和变形物理环境分析，应将固体地球子系统划分为岩石圈—软流圈—中幔圈—外核—内核和全球流体通道网络（图013－1）6个更次一级的子系统。

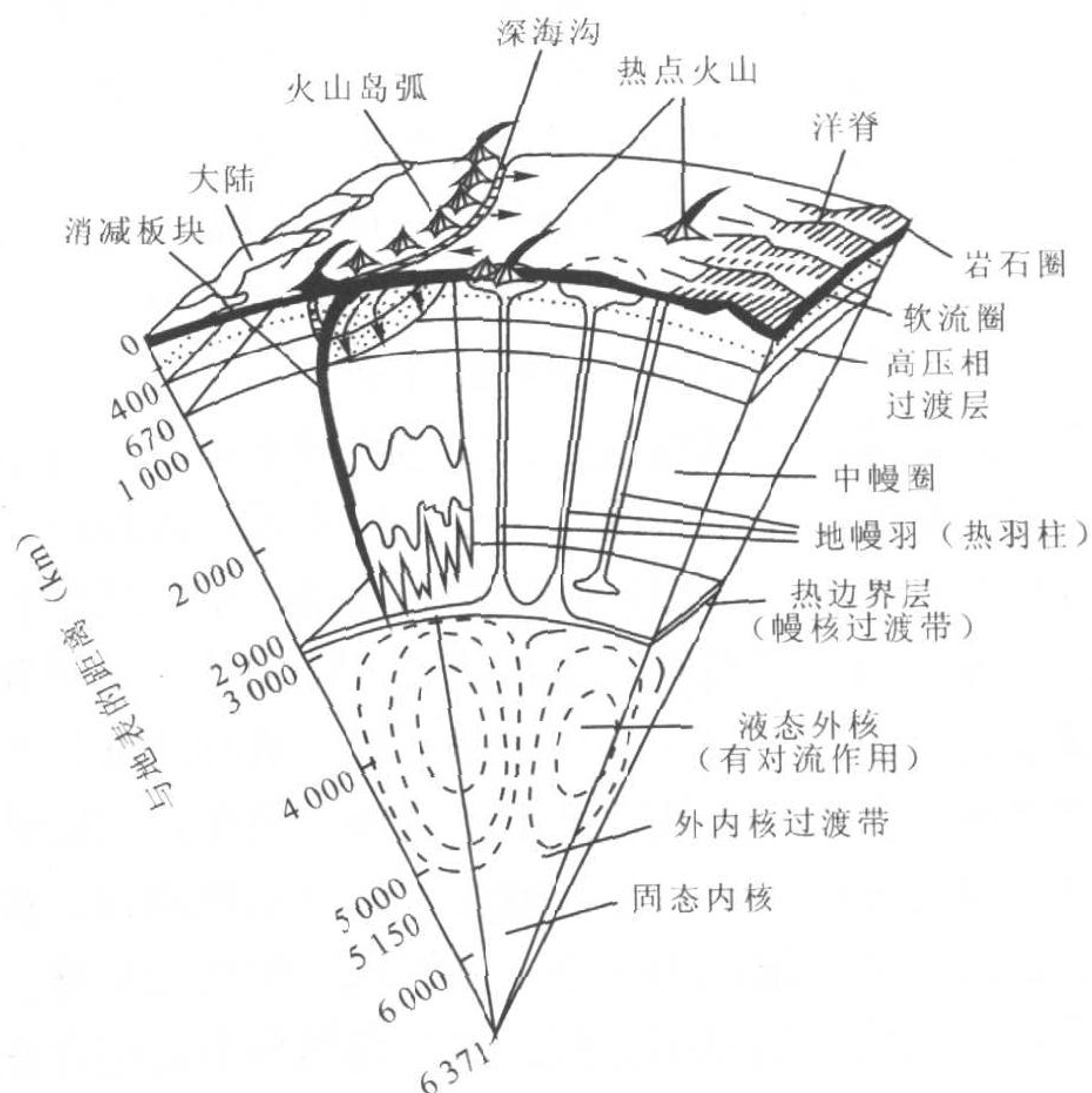


图013－1　固体地球系统模型
（Stroach，1991，修改）

岩石圈：岩石圈是固体地球的表层，包括地壳及浅地幔（岩石圈地幔）。美国地球动力学委员会（1987）关于岩石圈的定义是："地球的刚性外壳层，由一些能够相互运动的离散型板块所构成。概言之，板块的这种组合就称为岩石圈。"岩石圈的厚度在全球不是固定的，通常认为大洋中脊处最薄，远离中脊逐步增



厚，到大陆下部一般在150km左右。岩石圈也称为板块，是目前关注的焦点。

软流圈：在上地幔60～200km（大洋区）及100～300km或400km（大陆区）的范围内有一个地震波的低速带（高导和低Q）。这个低速带由于集聚了从内圈分异出来的水分和挥发分而导致上地幔超基性岩石部分熔融，并生成巨量熔浆，所以具有较高的可塑性（图013－2），故称为软流图。从运动学角度可以把软流圈看成上下两大刚性单元之间的耦合圈层，因为软流圈上部的岩石圈和下部的中幔圈的旋转运动存在着差异，软流圈平滑了上下圈层之间的相对运动，使地球整体运动处于协同状态。但最新资料表明，软流圈并不是连续的圈层，而是形状复杂的似层状体，代表局部熔融岩石的低速带在剖面上常被高速团块所阻隔，受阻的软流层或者为高速团块所抬升，或者下陷到670km相变面上方。

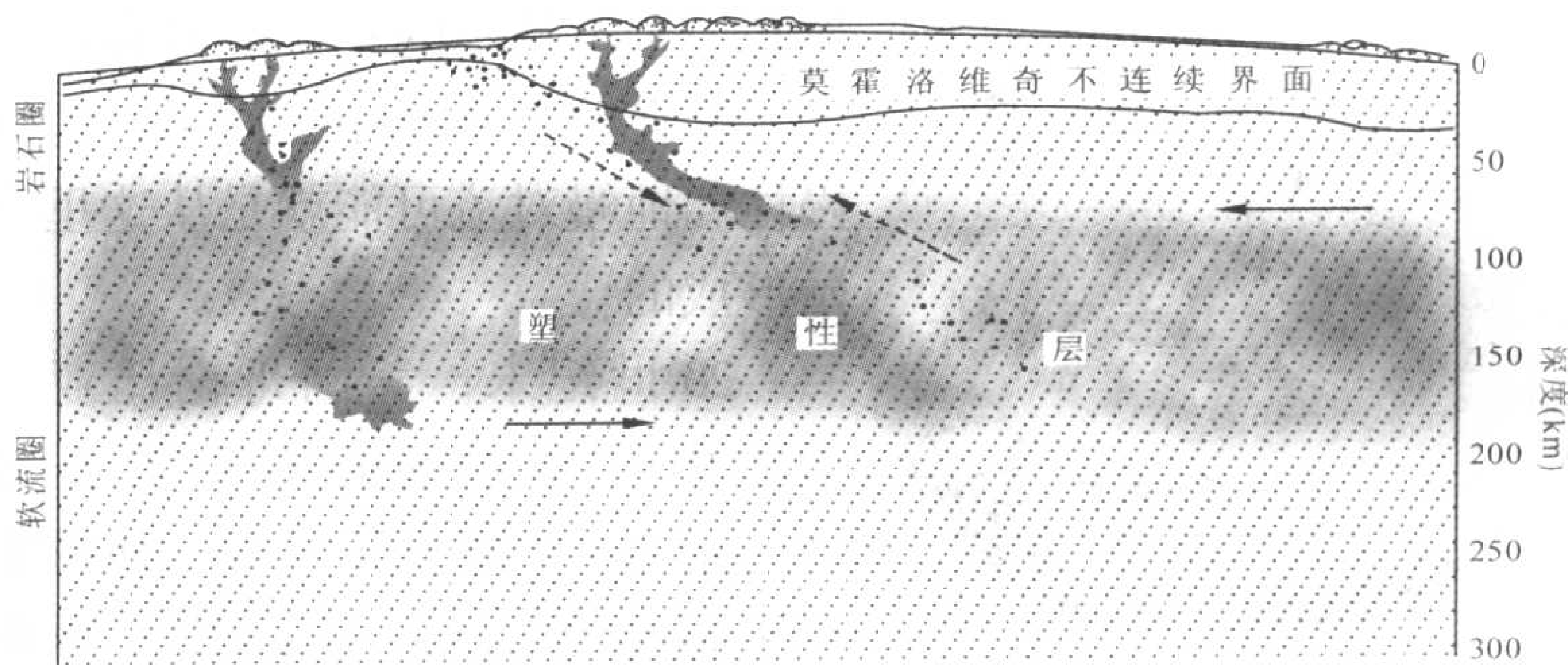


图013－2　上地幔低速塑性层（软流圈）横剖面图
图中黑点代表震源，虚箭头表示大陆在大洋的可能运动，实箭头表示软流图在整个岩石圈上的假设滑动，图上方的深灰色不规则柱体代表岩浆或熔岩

软流圈存在的直接证据为大洋中脊的火山熔岩流及大量熔融

岩浆活动，以及已观测到的地震和火山的频繁活动。

中幔圈：也称中间圈，是固体地球的躯干，深度为200～2900km，其中400km（20°间断面）和670km处的地震波不连续面是中幔圈内部的两个重要的不连续面，而670km又是深源地震的极限深度，所以传统上称670km以上的地幔为上地幔，它实际上是波速阶梯状增大的过渡带，而厚达2000km的下地幔波速相当高，但密度及Q值低于内核。

巨厚的中幔圈是固体地球系统中活动较少和较稳定的子系统。但近年来通过全地幔层析成像发现，中幔圈的波速并不均匀，存在多个不连续面，深度在830km、1000km、1230km、1650km、1900km及2540km附近均存在间断面，但很难断定它们是否具有全球性质。

地核：是地球系统的热源和重力源，可能也是最主要的动力源，而液态外核则是地球系统中最活动的圈层，它与中幔圈的边界是一个不均一的化学边界和热边界，存在着很强的相互作用，超级幔柱和地幔对流可能就是从这里开始形成的。

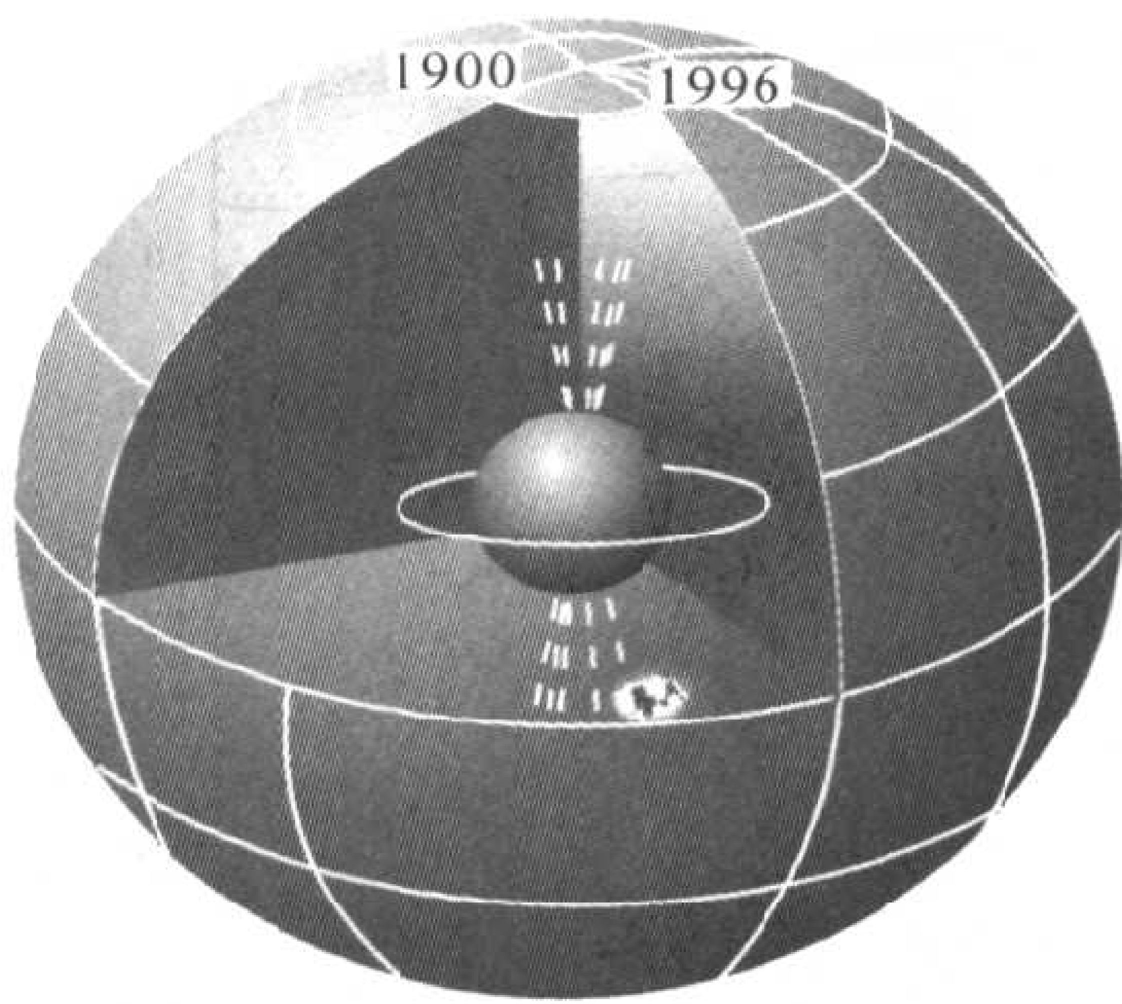


图013-3　地球内核差速旋转示意图（据宋晓东等，1996）图示内核旋转引起各向异性对称轴的移动

20世纪末，美国哥伦比亚大学的中国学者宋晓东和理查兹（P.Richards）博士又发现，地核相对于地球在旋转——内核差异旋转，他们估计，地球内核每年要自西向东较外核多旋转1.1°，自1900年到1996年的96年间，内核已多旋转了1/4圈多（图013-3）。这对于地壳运动来说是如同光速一样的巨大速度，比大陆漂移快10万倍（大陆漂移的线速率按20cm/a计）。地球内核相对于地

幔向东旋转，内核轴大约与地球轴倾斜10°，内核赤道比位于赤道的地壳每年多旋转19.31km。学者们普遍认为，内核差异旋转的原因很可能是由地球熔态外核流体所产生的巨大磁场的相互作用所引起的。这些磁场所产生的力矩使内核旋转加快，这与电动机中的旋转磁场引起电枢旋转的原理相同。这就是说，位于粘滞度极低的液体外核中呈差速旋转的内核“像一台巨大的电动机，产生了巨大的电流，这又转过来在地球周围产生磁场”。由于内核是刚性的，而它又位于粘滞度极低的液体外核中，所以内核旋转并不困难（宋晓东等，1997）。

目前不同学者已分别处理了不同的地震走时资料，估算出内核自西向东的差异速率为（1.1°~3.2°）/a，从而拉开了研究地核差异旋转及相关意义的序幕。尽管内核差异旋转的机制还没有最后认定，但这一奇特发现对于认识地球深部的动力学过程提供了极好的参考，具有重要意义。

014 固体地球系统的流体通道网络

流体通道网络是固体地球系统的一个重要子系统，它是连通外核—中幔圈—软流圈—岩石圈的物体运动体系，而流体活动是固体地球演化中的一个相当关键的因素，是地球充满活力的根源所在，也是地球区别于太阳系其他行星的最重要特征之一，对地球所有地质作用都十分重要。

这里所说的流体是相对固体而言的，指地球内部一切流动性的物质，如岩浆、矿浆、变质水、卤水、地热水、孔隙水以及地气等。据大多数学者估计，地壳中的流体含量约占地壳总质量的3%~6%，以3%计，则为6.9×10^{23}g；地幔中的流体含量约占地幔的0.03%，即1.2×10^{24}g，与地壳中的含水量相当（地幔总质量为4×10^{27}g），与海水的质量也十分相近，可知，三者即海水（水圈）、地壳、地幔中的流体处于相对平衡状态，并且是相

互循环的。

地球内部的流体源和动力源，目前公认主要来自于液体外核，而外核液体可能为富铁熔液悬浮体，同时含有一定数量的氢、硫、钙，以及金属氧化物、硅酸盐和放射性物质。现今的外核液体不仅处于剧烈的湍流运动之中，而且化学分异和分凝作用仍在继续进行。分凝和重力作用的结果，使铁、镍等重金属向内核聚集，而硅酸盐和金属硫化物及气体挥发分则向上运移，形成地幔中的热羽流（热羽柱）。图014－1即为这种热羽流（热羽

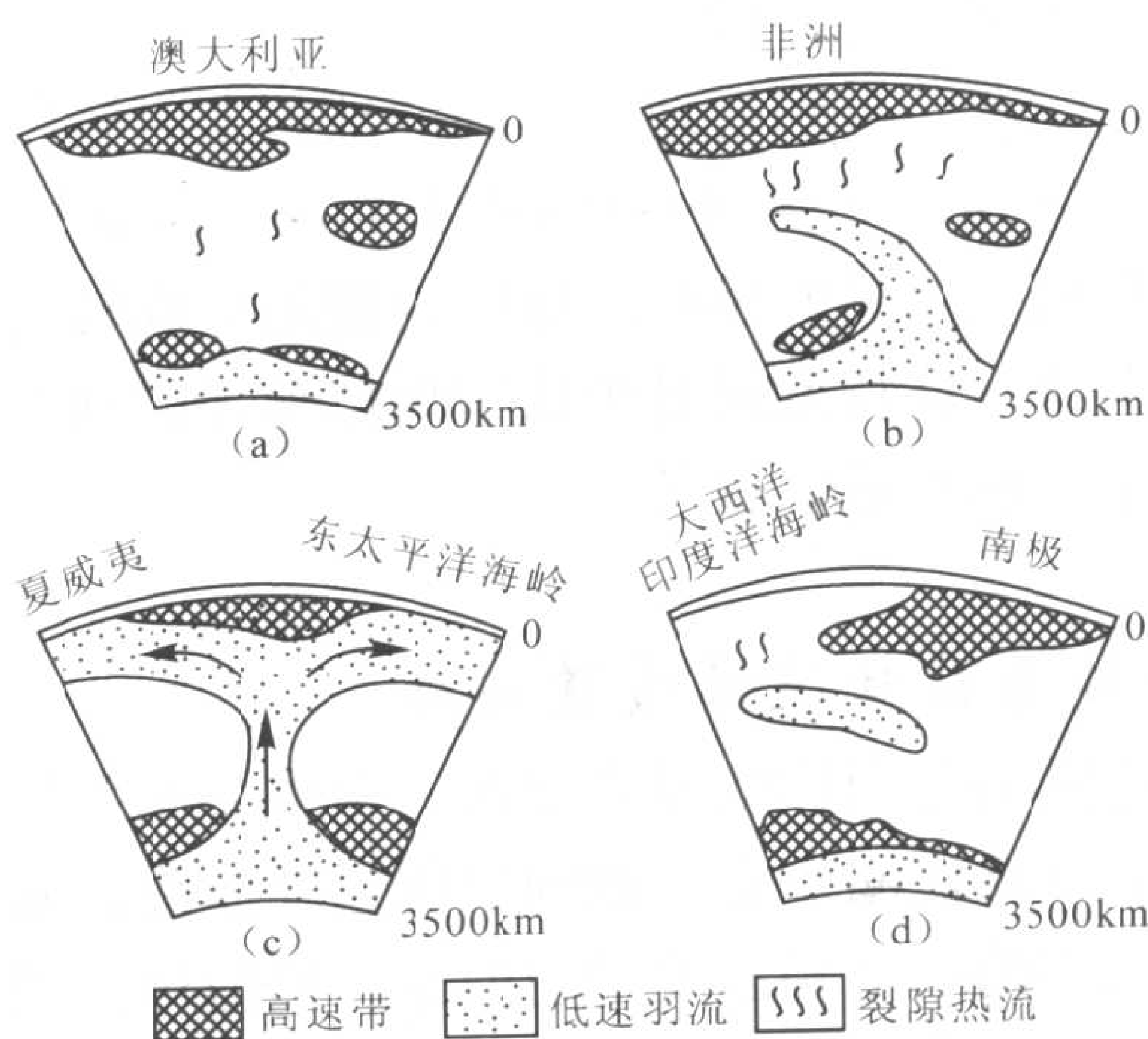


图014－1　热羽发育模式（Y.Fukao，1993）
（a）萌芽期热羽（外核微微上隆，热流及岩浆上涌）；
（b）发展期热羽（中幔圈下方形成热羽密集区）；
（c）全盛期热羽（热羽密集区连通外核与软流圈）；
（d）衰亡期热羽（上下堵塞残留的热羽带）

柱）的形成模式。中幔圈下方的外核流体在巨大的围压下做湍流运动，在地幔相对薄弱之处产生压裂作用，造成下地幔岩石的羽状裂隙。如果地幔中有原生裂隙存在，则它们相互连通，形成贯

穿整个中幔圈并连通外核与软流圈的裂隙网，外地核热流体沿这个通道网络上涌即形成图 014－1 的热羽发展模式，该模式是 Y.Fukao（1993）依据全地幔地震层析图总结出来的，自（a）至（d）依次为萌芽—发展—全盛—衰亡各期热羽。

萌芽期热羽（a）：除中幔圈有少量的裂隙外，没有密集的热羽带发育。表层为高速层覆盖，核幔边界上可能有不连续高速团块。外核中部微微上隆，热流上溢，澳洲及南极大陆（下方）可为该期代表。

发展期热羽（b）：如果（a）的高温液压致裂作用得以展开，将在中幔圈下部形成致密的热羽密集区，使地核内轻和易挥发组分上涌，并在上地幔形成较强的热流，（b）以非洲为代表。上涌的热流和水分可加速软流圈的熔融，可造成像东非大裂谷那样的大陆裂谷带。

全盛期热羽（c）：地幔中热羽密集区全面发育，可连通外核与软流层，并在上地幔形成分叉，此外热羽在流体通道上涌过程中，由于分异作用，重和易凝物质在核幔边界或热羽两侧产生积集，形成增厚的核幔过渡层，太平洋是这种类型的代表。

衰亡期热羽（d）：热羽带发育到高峰后将逐渐衰亡，仅在中幔层残留有低速高温的热羽残体，印度洋与大西洋中脊交汇处属于这种类型。

以上从不可逆时间轴方向所讨论热羽的萌芽—兴起—衰亡演化模式称为“热羽兴衰说”（杨文采，1998）。热羽从发育到衰亡的时间尺度，推测在 0.5～200Ma 之间。这个时间尺度与大洋岩石圈的年龄相同，与地磁极反转的时间尺度相符合。

大陆岩石圈内的流体通道目前已知的有：1. 大洋中脊和大陆裂谷，为软流圈玄武岩浆上涌带；2. 热点，全球已发现 50 多个热点，热点深度可达上地幔；3. 岩石圈部分熔融，如底侵作用、重熔作用产生的岩浆房与岩浆池等；4. 穿入地幔的断裂。



地壳内放射性物质蜕变放出的热可使地壳岩石发生大规模局部熔融，如果去水作用和放射性蜕变发生在最上地幔，则相应发生深熔作用而产生的玄武岩浆可穿过莫霍面而在地壳底部积集，称为底侵作用。地壳底部常见的高波速层（7.0～7.8km/s）就是底侵作用的主要证据之一，我国华北地台底部就赋存有这一高速层。在我国西藏，此高速层上方还有一个波速为6.0km/s的低速层，它可能反映沿碰撞破碎带侵入的玄武岩浆熔融体。

大陆岩石圈的流体通道网可形象地示于图014－2。图中除表示出岩石圈的各种通道外，在裂谷两侧还标出两种地幔物质的穿刺构造，一为大陆内部的金伯利岩筒，另一为陆缘榴辉—煌斑岩带，它们都和金刚石成矿有关。

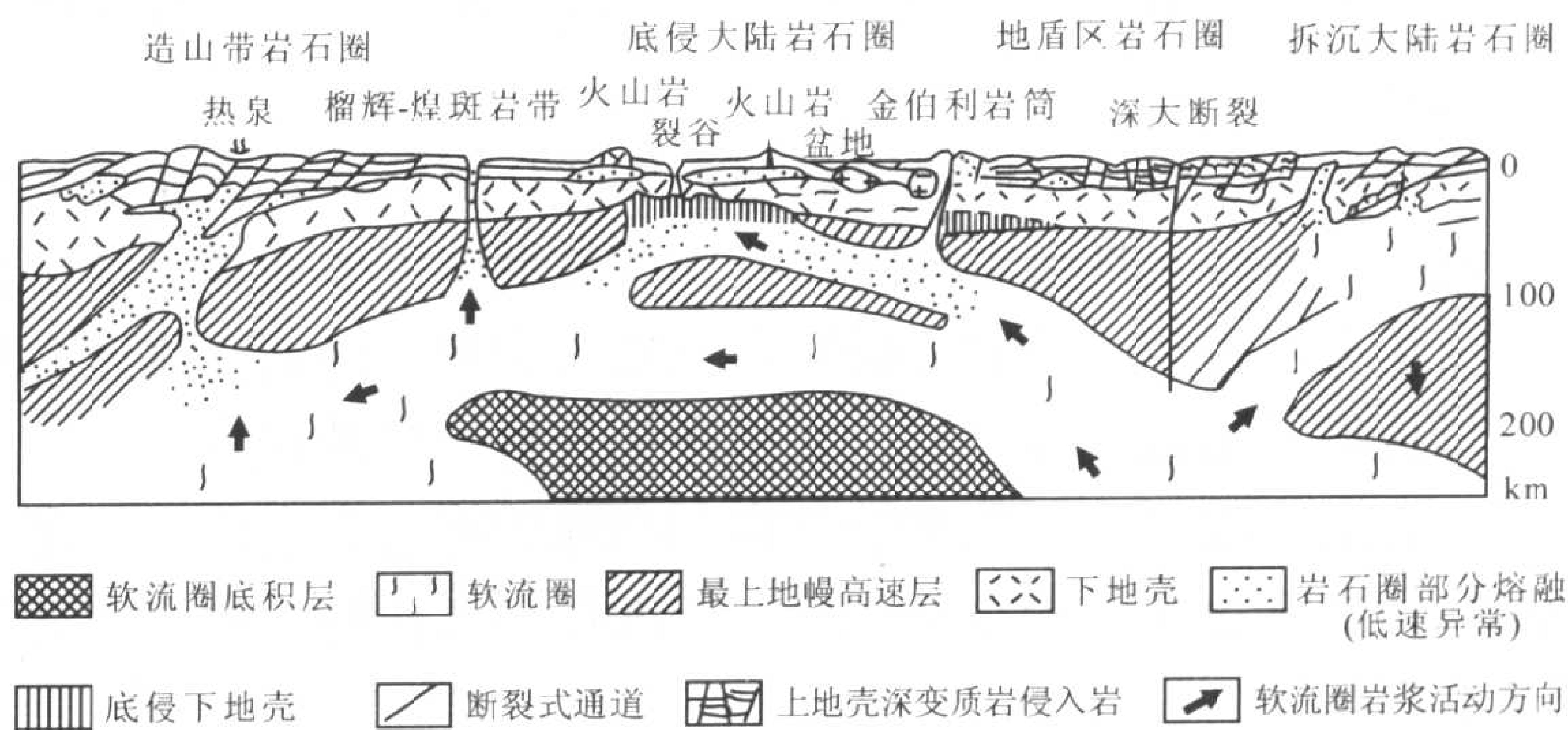


图014－2　大陆岩石圈流体通道示意图

地球内部流动活动属于开放的非线性系统，具体表现为间歇、分叉和伪周期性等不规则运动，火山爆发是间歇例子，地磁极倒转是分叉的例子，伪周期性是指地质事件貌似重复发生，但在时空上却具有不确定性特征。对于像地球这样具有多层次、多要素的复杂系统，各层次和各要素之间的相互作用和耦合作用，其演化必然不是简单的周期性所能表达的，伪周期性必然存在。

地震活动、全球海平面变化、全球生物灭绝等可能与非线性理论中的伪周期性有关。

近代科学研究指出，在开放的热动力学系统中，物理化学平衡的保持必须依靠持续的外力供给，目前还没有发现可维持地核流体活动平衡的外力。因此固体地球的演化发展是不可逆和不平衡的，实际上，迄今的地球演化都经历了由简单到复杂、由低级到高级的不可逆进化过程。

015 地球演化的能源与温度场

温度是地球内部能量——热能的直观表现，与地球的起源和演化有密切关系，也是地球各种构造运动和物理化学过程的主导因素。地球演化的能源主要是放射能和重力能，以放射能最为重要。放射能由放射性元素蜕变产生，重力能是地球物质重力分异作用的结果。地球演化的次要能源有太阳能、生物能、化学反应能及潮汐摩擦能等。

放射能：形成地球放射能的元素虽然很多，但只有具备下述三个条件才能成为地球内能的主要来源。这三个条件是：1. 有足够的元素丰度；2. 放射性生热量大；3. 放射性元素的半衰期与地球的年龄相当。这最后一个条件相当重要，因为半衰期短的元素，如^{26}Al、^{10}Be、^{136}Ce、^{60}Fe、^{244}Pu（钚）、^{247}Cm（锔）、^{237}Np（镎）等，只能在地球形成早期起作用，它们施加的热使太阳星云凝聚温度达2000K左右。半衰期过长者（超长寿命）至今尚未充分发挥作用，而只有与地球年龄相当者，即长寿命放射性元素如^{238}U（^{235}U）、^{232}Tn及^{40}K的放射能才是地球内热的主要来源。由于^{235}U含量仅有^{238}U含量的1/137.88，而K的含量是U含量的10 000倍，因此对现代地球内热有贡献的是^{238}U、^{232}Th及^{40}K。^{235}U对地球历史早期的热量也有过重要贡献。放射性元素^{238}U、^{232}Th及^{40}K在地球演化过程中，主要集中于地球地壳及上地幔顶部，以大陆地

壳的酸性岩（如花岗岩）中最为富集，其生热总量约占70%，其次为基性岩，占20%，再次为超基性岩，占10%。地球内部来自不同深度的热源其比例大致为0~100km为50%，100~200km为25%，200~300km为15%，300~400km为8%，大于400km为2%。

重力（分异）能：重力能是地球演化的另一种重要能源。表现在以下几个方面：1.地球吸积形成时的物质分异过程有大量重力位能释放，只是由于吸积形成时的能量大都释放到了宇宙空间，所以只在地球早期起过作用。地球形成后的核—幔—壳分异也有大量重力位能释放。2.在地球表层，由于各圈层和各区域物质密度的差异所引起的静压和浮力作用，亦属于重力位能。这种作用对于板块运动、火山、地震活动都起着十分重要的作用。比如在俯冲带，由于俯冲板块的密度比软流圈密度大，所以产生了板块下沉的牵引力。又如在海洋上，海洋板块上的火山喷发高度就与海洋板块厚度有关；在大陆上，厚大的大陆地壳会阻止火山岩浆的喷发，这都是静压作用的影响。3.剪切应力作用，在板块挤压带，剪切应力可导致局部地区温度上升，形成物质熔融，不过这种能量对于地壳重熔的贡献是很小的。

地球温度：太阳辐射决定着地球表层的温度，而地球内部的温度主要源于放射性元素衰变所释放的能量，一般随深度的增加而增高，但不成正比。地球内部温度随深度增加而升高的温度曲线如图015-1所示。由图可知，地心的温度在4000℃~5000℃之间，但也有学者认为，地心温度可高达6000℃~8000℃，而熔点则更高。地球内部蕴藏的这种高温热量，据估算约为1.4×10^{21}J/a，相当于20世纪70年代末全球煤、石油、天然气总耗量的3~4倍，而每年流出地表的热能约为44×10^{12}W，相当于全球电能消耗（10^{12}W）的44倍，大约是每年通过地震释放能量的100倍。如此巨大的热量释放，为什么地球人类并不觉得灼热难

忍呢？这主要与地球有一个良好的绝热外壳即岩石圈有关。岩石圈既防止了地球内部热量的太空散失，又保护了人类免遭地球内部高温的伤害。

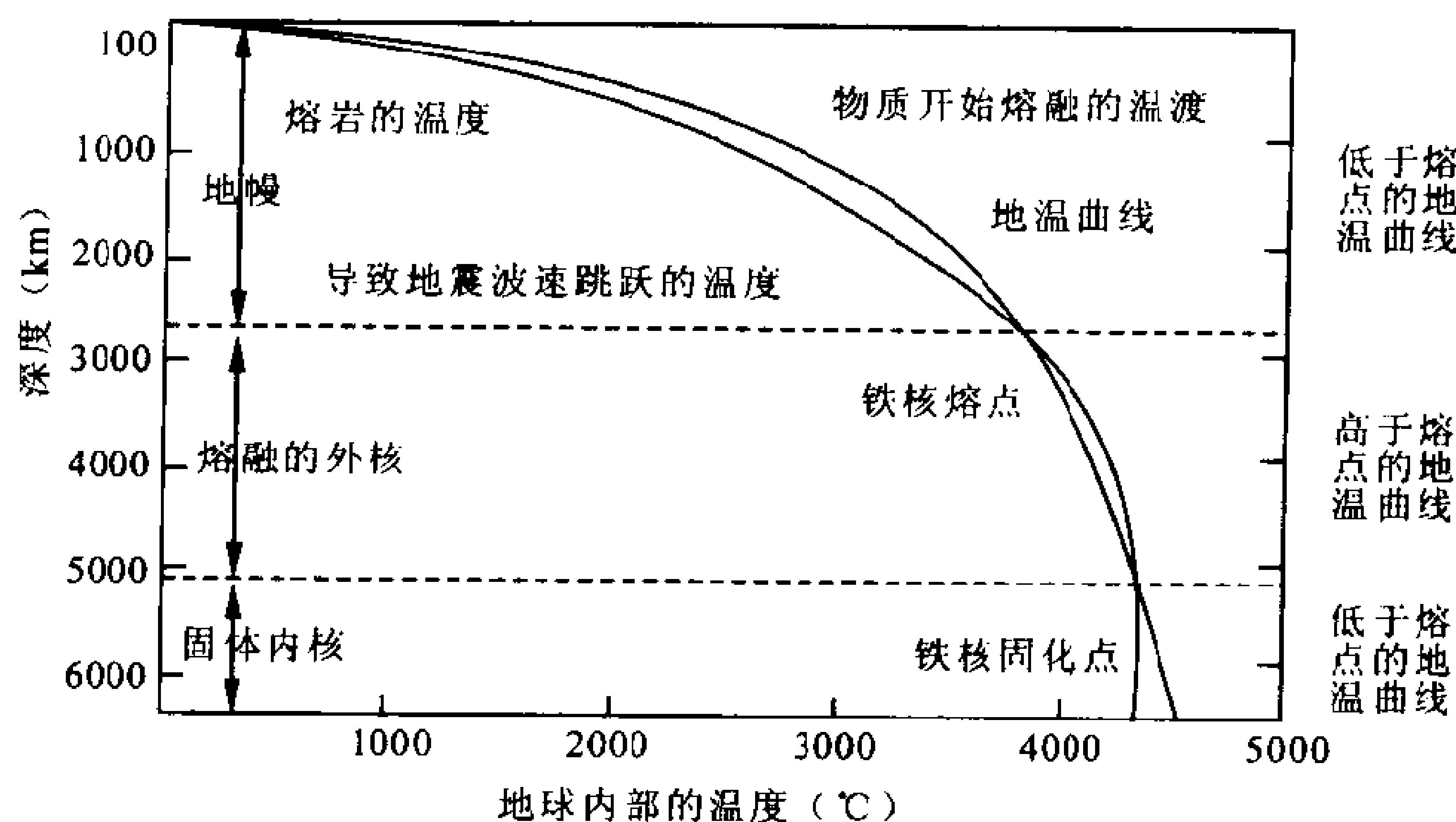


图 015 - 1　地球内部温度曲线
（汪集旸等，2001）

大地热流：简称热流，指的是地球内热以传导方式传输至地表，并散发到太空中去的热量，即散失的地球内热，是可以通过大陆和海洋的直接观测计算的，在数值上热流等于岩石热导率与垂向地温梯度① 的乘积。

大地热流是一个综合性参数，是地球内热在地表（或海洋）可直接测量到的惟一物理量，它比其他地热参数（如温度、地温梯度）更能确切地反映一个地区热场（温度场）的特点。

根据学者们对全球不同构造单元的热流研究，全球地表平均热流值约为 1.32HFU②，但就某一具体构造单位而言则有不同的

① 地温梯度是在近地表恒温带以下，深度每增加 1km 地下温度增加的度数。

② 1HFU 即 μCal /（$cm^2 \cdot s$），HFU 是其简记。1HFU = 41.87mW/m^2。

热流变化。如海洋板块在大洋中脊和地幔热点处热流较高，可达2～10HFU，海沟热流较低，小于1HFU。大洋平均热流：太平洋为1.78±1.15HFU，大西洋为1.34±0.88HFU，印度洋为1.54±1.18HFU，以太平洋的热活动性较强。大陆板块以年轻造山带热流较高，可达2HFU，地盾区较低为0.8～1.0HFU。地质学家推测，上升的热对流柱位于盆地和年轻造山带之下，这里有热异常、火山作用和地震活动等所释放能量的构造运动。

此外，据我国学者（汪洋等，1999）计算，南北半球及0°半球（大西洋半球）和180°半球（太平洋半球）的平均热流值及相应的热散失量亦存在着明显差异。南半球的热流值高出全球平均值的14%，0°半球高了8%，相应的热散失量分别占全球热散失量的57%和54%；而北半球则比全球低15%（热散失量占43%），180°半球低9%（热散失量占46%）。也就是说，固体地球表面的热量分布具有半球级非对称性，南半球和0°半球是相对热的半球，而北半球和180°半球是相对冷的半球。从热散失量角度看，0°半球的南半部是当今地球内部向外散热的主要区域（约占1/3），180°半球的北部散热量最少，这意味着当今的地球是南热北冷，南胀北缩，这种南北（0°/180°）胀缩的非对称性现象是地球三轴非对称性的一部分，可能与“地球质心及几何中心以及地热中心的偏离”有关。

016 Pb（铅）Sr（锶）Nd（钕）同位素与地球演化

众所周知，原子是由原子核和核外电子组成的，而原子核则是由质子和中子所组成的。质子数相同而中子数不同的原子称同位素。同位素可分为放射性同位素和稳定同位素两大类。放射性同位素不仅可用于计算地质体年龄，而且其初始比值还能为地球地质（事件）演化提供重要的信息。^{235}U、^{238}U、^{87}Rb、^{147}Sm经放射衰变形成的子体同位素^{207}Pb、^{206}Pb、^{87}Sr、^{143}Nd就是这样的放射性

同位素。

1.Pb 同位素：最主要的同位素是^{208}Pb、^{207}Pb、^{206}Pb、^{204}Pb，前三种同位素分别为^{230}Tn、^{235}U、^{238}U 的放射性衰变产物，而^{204}Pb 为非放射成因，所以也称为原生 Pb，因此常将^{204}Pb 作为 Pb 同位素比较的基础。

假设地球形成时原始 Pb 的丰度是均匀的，则可由陨石中 Pb 的同位素测量结果即$^{206}Pb/^{204}Pb = 9.307 \pm 0.006$ 和$^{207}Pb/^{204}Pb = 10.294 \pm 0.006$ 所代替。

令地球形成的时间为 T（取 $T_0 = 4570Ma$），地质体形成的时间为 t，现在测定时间为 t_0。

自然界中^{235}U 与^{238}U 比值为一常数，即$^{235}U/^{238}U = 1/137.9$；地质体中 Pb 同位素$^{206}Pb$、$^{207}Pb$ 的丰度随时间变化的方程式为：

$$(^{206}Pb/^{204}Pb)_t = (^{206}Pb/^{204}Pb)_0 + (^{238}U/^{204}Pb)(e^{\lambda T_0} - e^{\lambda t}) \quad (16.1)$$

$$(^{207}Pb/^{204}Pb)_t = (^{207}Pb/^{204}Pb)_0 + 1/137.9(^{238}U/^{204}Pb)(e^{\lambda' T_0} - e^{\lambda' t}) \quad (16.2)$$

式中衰变常数：λ 为 $0.155125 \times 10^{-9}/a$，λ′ 为 $0.984850 \times {}^{-9}/a$；以（16.1）式除（16.2）式得：

$$\frac{(^{207}Pb/^{204}Pb)_t - (^{207}Pb/^{204}Pb)_0}{(^{206}Pb/^{204}Pb)_t - (^{206}Pb/^{204}Pb)_0} = \frac{1}{137.9}\left[\frac{e^{\lambda' T_0} - e^{\lambda' t}}{e^{\lambda T_0} - e^{\lambda t}}\right] \quad (16.3)$$

（16.3）式即 Pb－Pb 等时线方程。在给定 t 值时方程（16.3）在（$^{207}Pb/^{204}Pb$）－（$^{206}Pb/^{204}Pb$）坐标图上为一条直线，此直线即单阶段等时线。

从 Pb 同位素比值，即从（16.1）式中可求得$^{238}U/^{204}Pb$ 比值，即 μ 值：

$$\mu = \frac{(^{206}Pb/P^{204}Pb)_t - (^{206}Pb/^{204}Pb)_0}{(e^{\lambda t_0} - e^{\lambda t})}$$

$$= \frac{(^{206}Pb/P^{204}Pb)_t - 9.307}{(e^{\lambda t_0} - e^{\lambda t})}$$

给定一组 μ 值可在 Pb－Pb 单阶段等时线坐标图上得到一组单阶段理论增长曲线（图 016－1）。

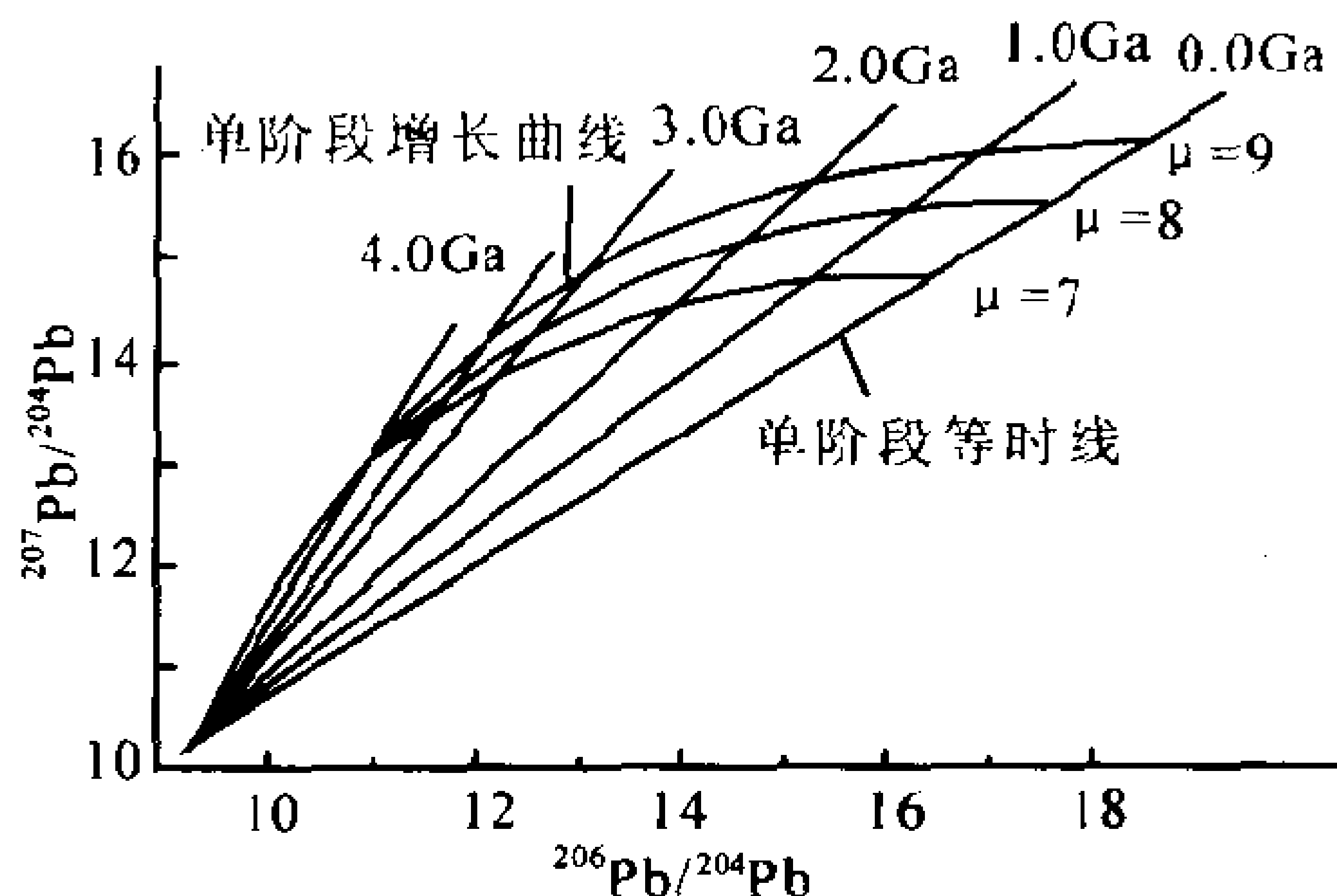


图 016－1　普通 Pb 单阶段等时线和单阶段理论增长曲线（引自赵伦山等，1989）

假定放射成因 Pb 的增长都是由源区物质 U 衰变而增加的，则 μ 值的变化就能反映出地质体源区 U－Pb 同位素所经历的地质演化（迁移）过程。根据大量测试结果统计，幔源岩石的 μ 值一般为 7～8，地壳岩石的 μ 值一般大于 9。

Pb 同位素的具体应用以格陵兰片麻岩为例予以说明。格陵兰 Amitsog 片麻岩的岩石年龄为（3750±70）Ma，NûK 片麻岩的年龄为（2850±50）Ma。过去许多学者都认为 NûK 片麻岩是 Amitsog 片麻岩重熔改造的结果，然而全岩 Pb－Pb 同位素测量数据却表明，构成这两套岩石的等时线分别切割了年龄值为 3750Ma 及 2850Ma 的单阶段增长曲线，该增长曲线的 μ 值为 7.6，属于地幔原始铅 μ 值范围。这表明，不论是 Amitsog 片麻岩或 NûK 片麻岩，它们的岩浆都来源于上地幔或上地幔分离出来的基性岩石圈，NûK 片麻岩不可能是 Amitsog 片麻岩重熔改造所形成的。

2.Sr 同位素：自然界中 Sr 主要有 4 个同位素 ^{84}Sr、^{86}Sr、^{87}Sr、^{88}Sr，其中部分 ^{87}Sr 是 ^{87}Rb 放射性衰变的产物，其 $^{87}Rb \rightarrow {}^{87}Sr$ 的衰变方程为：

$$({}^{87}Sr/{}^{86}Sr)_p = ({}^{87}Sr/{}^{86}Sr)_i + ({}^{87}Rb/{}^{86}Sr)_p(e^{\lambda t}-1)$$

式中 $({}^{87}Sr/{}^{86}Sr)_p$ 和 $({}^{87}Rb/{}^{86}Sr)_p$ 由样品实测获得，$({}^{87}Sr/{}^{86}Sr)_i$ 为地质体形成时的初始比（Ri），λ 为 ^{87}Sr 的衰变常数，t 为地质

体年龄。

在幔壳的长期演化过程中，由于 K - Rb 关系密切，K 向地壳富集，所以 Ri 值常作为判断岩石是来自地幔或来自地壳的重要参数。通过测试发现，玄武质无球粒陨石的 Ri 值最低，为 0.698990 ± 0.000047，据此把 0.699（约略值）定为地球形成时 Sr 的同位素初始比值，缩写为 BABI（Basaletic Achondrite Best Initial）。假定 K 向地壳富集对地幔体系中的 Rb/Sr 比值影响不大，那么地幔的 Ri 值将是年龄的函数，也就是说，Sr 同位素演化线近似为一直线，这条线称之为地幔理想演化线，而地幔平均演化线则位于地幔理想演化线之上。地壳由于富集 K，使体系中的 Rb/Sr 值高于地幔，因而地壳演化线的斜率为最高。一般认为，Ri 值[①] 为 0.703 ~ 0.706 者属幔源，而大于此值则认为是壳源或者是受壳源物质混染的幔源岩石。仍以格陵兰片麻岩为例，经测试 Amitsog 片麻岩的 Ri 为 0.7010 ± 0.0005，NûK 片麻岩的 Ri 为 0.7020 ± 0.0005，二者都落在相应年龄的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 上地幔增长线（演化线）附近，表明 NûK 片麻岩也是从低 Rb/Sr 比值的上地幔分离出来的。我国河北迁西麻粒岩、山西五台变质火山岩等，经测试也都是由上地幔源区所提供的岩浆物质而形成的。由古老地壳重熔形成的岩石仍以格陵兰片麻岩区为例，则为该区年龄值为（2520 ± 90）Ma 的 Qôrqut 花岗岩，它的 Ri 值为 0.709 ± 0.007，可能是由老地壳物质重新改造而形成的。我国西藏喜马拉雅岩带花岗岩，其 Ri 值为 0.749，显然为印度板块与欧亚板块碰撞后，由其地壳物质重熔而形成。

3.Nd 同位素：在自然界 Nd 有 7 种同位素，其中 ^{143}Nd 为

---

① 整个地球现代地幔的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值为 0.7045，Rb/Sr 比值为 0.029 ± 0.003，$(^{87}Rb/^{86}Sr)_{UR}$ 为 0.839；大洋中脊玄武岩的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 为 0.7025；北美大陆壳的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 为 0.719。

^{147}Sm 的衰变产物。$^{147}Sm \rightarrow ^{143}Nd$ 的衰变方程为：

$$(^{143}Nd/^{144}Nd)_p = (^{143}Nd/^{144}Nd)_i + (^{147}Sm/^{144}Nd)_p (e^{\lambda t} - 1)$$

式中 $(^{143}N/^{144}Nd)_p$ 和 $(^{147}Sm/^{144}Nd)_p$ 为样品实测得出的现在的 Sm、Nd 同位素比值，$(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$ 为地质体形成时的初始比，t 为样品的同位素年龄，λ 为^{147}Sm 的衰变常数（$6.54 \times 10^{-12}/a$）。

与 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 一样，$(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$ 也反映地质体形成时源区的 Sm－Nd 同位素分配。由于地幔岩石的 $(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$ 值与球粒陨石接近，因而认为未分异地幔的 Nd 同位素与球粒陨石一致。然而在地幔的熔融过程中，Sm 的分配系数（晶体/熔体）比 Nd 为高，Nd 更容易进入熔体，并向地壳富集，所以地壳的 $(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$应低于球粒陨石；地幔上部的 Nd 相对于 Sm 亏损，$(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$ 相对高于球粒陨石，为应用方便，用 ε_{Nd}表示：

$$\varepsilon_{Nd} = \frac{(^{143}Nd/^{144}Nd)_i - 1}{(^{143}Nd/^{144}Nd)_c} \times 10^4 \qquad (16.4)$$

式中 $(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$ 为样品的初始比；$(^{143}Nd/^{144}Nd)_c$ 为球粒陨石的初始比（0.512643），由（16.4）式可知：未分异地幔的 $\varepsilon_{Nd} = 0$，大陆地壳的 $\varepsilon_{Nd} < 0$，亏损地幔的 $\varepsilon_{Nd} > 0$。学者们普遍认为用 ε_{Nd}研究地球演化，不仅可使地球演化过程步步深入，而且将 ε_{Nd} 与$^{87}Sr/^{86}Sr$ 相结合也是划分地球岩浆源区的有效参数。根据这一参数，即 ε_{Nd} 与$^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值，美国学者 G.T.Wasserburg 等（1979，1981）提出了地球发展模式，他们设想：在地球形成的最初阶段，地球是一个均一的、未亏损的地幔，后来由于地壳的形成，地幔分出了地壳及部分亏损的上地幔，以及没有亏损的下地幔。在前太古宙（3800Ma 前）时期，地壳物质大量回流到地幔，而到了前太古宙晚期，地幔向地壳输送的物质超过了地壳向地幔回流的物质。这就是为什么至今未能在地球上找到比 3800Ma 更古老的地壳物质的主要原因。



017 大陆壳与大洋壳

大陆壳与大洋壳是地壳构造的两个一级构造单元，目前已获得较为一致的认识。大陆壳是地理大陆的上部，是人类生存的第一环境，大洋壳被大洋水覆盖，是海水面下部表层，海洋是人类生存的第二环境。从地壳结构及组成看，大陆壳与大洋壳存在着明显差异（图 017 – 1）。

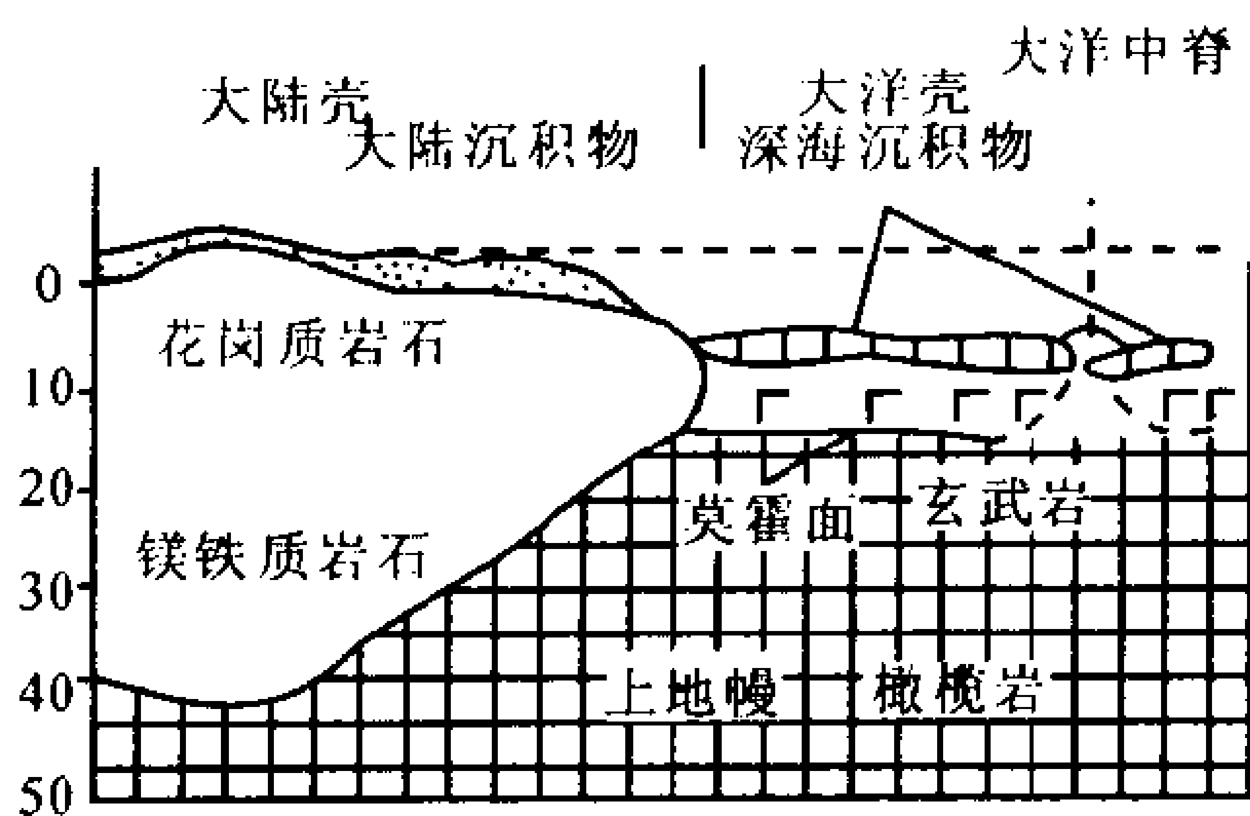


图 017 – 1　大陆壳与大洋壳结构示意图

大陆壳：简称陆壳，包括陆地上的地盾、地台、褶皱带等范围的地壳，以及海面下大陆架和大陆坡范围内的地壳。整个陆壳的体积虽仅占地球体积的 0.4%，但由于大陆壳是地幔的物质分异产生的残渣，是地球演化至今所形成的天然“垃圾堆”，所以保存了自太古宙以来各个地质时期的历史记录。大陆壳厚度变化在 30 ~ 80km 间，平均厚度为 33km（或 33 ~ 38km），但各处并不均一。大陆壳传统上以二级不连续面，即康拉德间断面为界再区分为上陆壳和下陆壳。上陆壳以花岗质岩层或花岗闪长质—闪长质岩层为主，厚 8 ~ 12km。壳内富集大离子亲石（亲氧）元素（LIL）、生热元素（K、Tn、U）、亲稀土元素及其他不相容元素，具有高的 Rb/Sr 和 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值；下陆壳的典型岩石为基性麻粒岩，亏损上述元素，特别是生热元素，Rb/Sr 及 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值较低。

20 世纪 80 年代以来，大量观测资料及大陆科学钻探表明，陆壳结构的不均匀性远比上述分层复杂得多。俄罗斯科拉半岛超

深钻井结果表明，元古宙岩层不是延伸至3~4km，而是延深至7km；原预测在7km处应有康氏（C）面，实际上并不存在，而在该深度及以下均为太古宙针长片麻岩、花岗片麻岩和角闪片麻岩，未见到玄武岩和基性岩体。最近的观测资料还表明，C面在许多地区并不存在，上下陆壳之间也没有截然界面，而是复杂的交错和渗透。因此大陆某一地区的实际分层，应根据该地区 V_p 速度变化具体划定，通常采用三层模式：上地壳（V_p 为5.9~6.3km/s）、中地壳（6.4~6.7km/s）和下地壳（6.8~7.6km/s）。

陆壳的地质分层是陆壳形成后进一步分离的结果。德帕洛（D.J.Dewpaolo，1981）基于Sm－Nd和Rb－Sr同位素研究，计算出陆壳分层发生在陆壳形成后250Ma时期。泰勒（S.R.Taylorm，1979）根据稀土元素（REE）分布形式及Sr同位素认为，上下陆壳的分离是由于2500Ma前陆壳发生广泛的部分熔融事件所造成。

陆壳的化学成分采用S.R.Taylor（1985）的计算结果。由此计算结果可知：上陆壳富含高度不相容元素Cs、U、Tn、Bi、Tl、Pb、Rb、Li、Nb、La、Ce、K等，下陆壳富含过渡元素V、Co、Cu、Ni、Cr、Sc、Ag等，而洋壳则富含铁镁质。中国陆壳的平均化学成分采用黎彤等（1988）的计算结果，对比可知，中国陆壳的微量元素除Cr、Ni、V、Cu、Sc外，其他元素都较全球陆壳（陆壳整体）为高。

大洋壳：简称洋壳。大洋壳指以大洋盆地为主体的洋区地壳。对大洋壳的了解和认识，主要基于海底打捞、海洋钻探和海洋地震等。洋壳与陆壳相比：1.洋壳较薄，厚0~10km，最薄处仅1.6km，平均为5~6km；2.缺失陆壳特有的花岗质岩层，而以基性火山岩（玄武岩）为主，有少量基性—中性岩岩墙；3.洋壳较年轻，一般不超过2亿a，而大部分陆壳的年龄至少为10亿a；4.洋壳可通过板块俯冲“回到”地球内部，可以“轮回”和“再生”，而陆壳则是以古老陆核为核心的块体，既不能“轮

回"，也不能"再生"。大洋壳一般有三个层次（图 017－2）：层 1 为沉积层（物），以钙质软泥为主，其次为铁质和硅质软泥；层 2 为火山岩层（主要为枕状玄武岩及蚀变玄武岩）；层 3（大洋层）为洋底玄武岩，是洋壳的主要组成部分。玄武岩化学成分中 K_2O、TiO_2、LREE（轻稀土元素）含量低。Rb/Sr 比值和 $^{87}Sr/^{86}Sr$初始值表明，洋底玄武岩来源于"亏损型"地幔地球化学储源。根据迄今的海洋资料，大多数学者都接受大洋地壳的下列岩性柱（自上而下排列）：海洋沉积物→洋底玄武岩→席状岩墙带→辉长岩及超镁铁堆积岩→上地幔顶部变形橄榄岩。可知洋壳与陆壳岩石组成的差别相当明显。

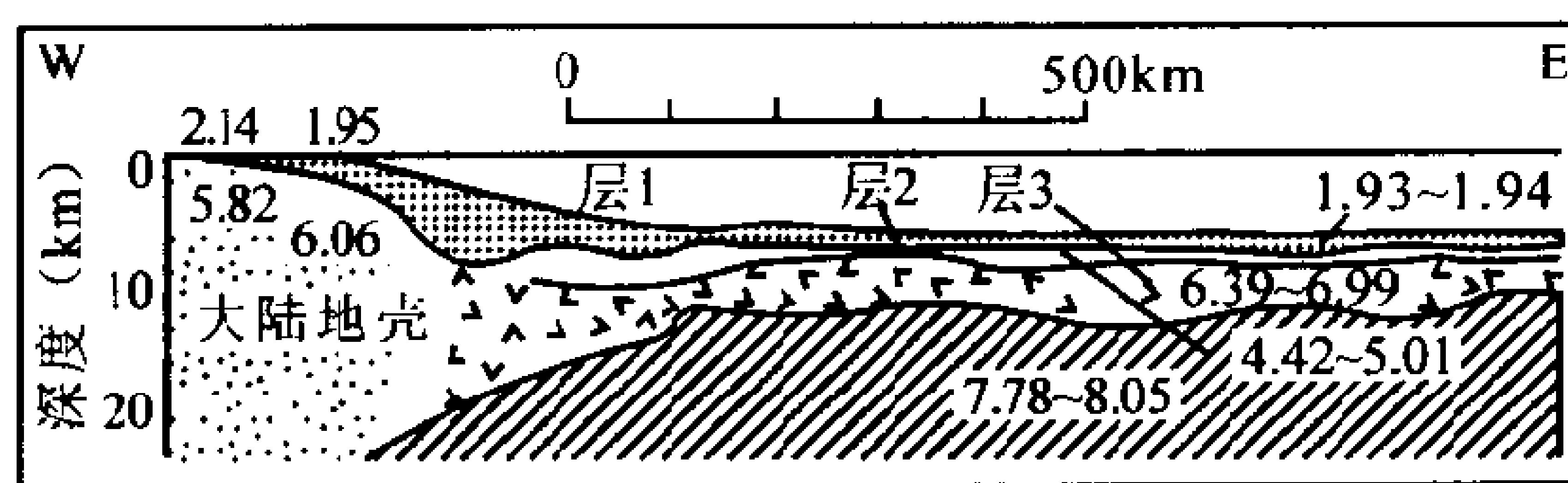


图 017－2 大西洋南部（阿根廷）大洋壳剖面图
（图中数字为 V_P 值，单位为 km/s）

全球洋壳的化学成分采用 S.R.Taylor 等（1985）提供的大洋玄武岩的平均化学成分。与陆壳相比，SiO_2、Na_2O、K_2O 含量相对偏低，MgO、ΣFeO（全氧化铁）、MgO、CaO、TiO_2 含量相对偏高；与 Fe、Mg 地球化学性质相似的微量元素，如 V、Co、Ni、Zn、Cd 等和 HREE（重稀土元素）相比含量较陆壳高；与 Na、K 性质相似的元素，如 Rb、Cs、Ba、Sr、Zr、Nb、U、Th 等元素和 LREE 含量较低。

需要指出的是在大陆与大洋之间还存在一个过渡壳，即岛弧与大陆边缘，过渡壳一般厚 15～30km，虽然体积和质量在地壳总体中的份额很少，对地壳总体化学成分影响也不大，但对地球演化以及对矿产资源勘查和地质灾害防治却有重要意义。

018 地壳的起始增长和重熔再造

根据迄今的观测数据，地球陨石的 Rb - Sr 和 U - Th - Pb 年龄约为46亿a，月岩的年龄亦在（46±1）亿a左右。现代星云说认为：地球是由陨石吸积所形成的，或者是与陨石母体同时形成的，因此地球的年龄可能也在46亿a左右。如此则原始地壳的年龄即起始形成时间显然不会是46亿a，而应比46亿a晚，但究竟晚多少，目前尚无定论。因为地球演化过程中多次重复的各类变质作用可能已使大部分最古老的原始地壳消失殆尽，即使有所遗留，其同位素信息也已发生变化，所以寻找残留的原始地壳的工作还十分棘手。

目前在太古宙地盾区，如西格陵兰、南非、西澳洲、北美及波罗的海等地，已相继发现有大于30亿a的古老地壳，最老的年龄是康普斯顿（W. Compston）在西澳洲用离子探针测得的单颗锆石的年龄（矿物年龄）为42亿a，但其普通 U - Pb 年龄仍在36亿a左右。我国冀东迁西以 Sm - Na 法测得暗色残留体的等时年龄为35亿a，然而在某些太古宙深变质岩区，Pb同位素的模式年龄显现出大约在40亿a前就分异有不同 U/Pb 比的地区，这些地区的 U/Pb 分异可能与原始地壳形成有关，因此推测最古老的大陆壳可能在38～40亿a前就已出现。而大洋壳因目前还未发现有大于2亿a的年龄，所以洋壳只有中生代以来的发展史，那么之前的洋壳到哪儿去了呢？20世纪60年代的板块构造说给予了答复。板块说认为，大洋壳一方面通过洋脊不断生长，另一方面通过俯冲作用或重熔消失或重返地幔而消亡。因此，只有陆壳的某些地区才可能保存有少量古大洋的洋壳残片。于20和21世纪之交在我国河北遵化发现的蛇绿岩杂岩已被公认为是25亿a前全球最古老、最完整的大洋壳残片。发现者是北京大学李江海博士，以及与其合作的美国圣路易斯大学的 T. Kusky 教授和华盛

顿大学的 R. Tucker 教授。

关于大陆壳的增长方式及生长速度，根据有关研究主要有五种模式：1. 大陆壳的迅速生长发生在地球历史的早期，随后地壳物质通过地幔或在地壳内形成再循环；2. 大陆壳的形成随时间呈指数增加；3. 大陆壳的生长与地壳再循环呈线性关系；4. 地球分异早期，大陆壳迅速增长，太古代陆壳进入缓慢线性增长期；5. 大陆壳主要在新太古代迅速增长，基本上构成现今陆壳的主体，元古宙后才大大降低了增长速率。

第 1 种和第 2 种模式都是陆壳生长的极限模式，而愈来愈多的研究发现，大陆壳实际生长速度介于二者之间；第 3 种模式的困难是 Pb、Sr、Nd 同位素数据说明，至少 50% 的陆壳是在大约 25 亿 a 前形成的；第 4 种模式反映地壳早期快速生长，但 Nd 同位素初始值不支持这一模式；第 5 种模式得到同位素资料的支持，元古宙的大面积克拉通化和前寒武纪地层的普遍发育表明，这种模式可能接近于迄今所知的大陆壳实际。

近年来的观测研究表明，中生代以来的钙碱性系列的闪长岩—花岗闪长岩和英云闪长岩可以从上地幔岩石的部分熔融派生出来。此与组成太古宙地壳的主要岩石，即奥长花岗岩—英云闪长岩—花岗闪长岩组合（简称 TTG 组合或 TTG 岩套）类似。但前者即中生代钙碱性系列的闪长岩—英云闪长岩—花岗闪长岩，不是分布于太古宙地盾，而是分布于岛弧俯冲带和大陆边缘（如北美加利福尼亚、日本列岛和我国西藏冈底斯岩带）。从岩石 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始比值（0.703 ~ 0.708）、K/Rb 比值（200 ~ 300）及 Al_2O_3/TiO_2 比值（20 ~ 30）等地球化学特征判断，它们是地幔派生的，不是基底岩石重熔的产物。然而与它们伴生的深成岩基（比如北美加利福尼亚）岩石的较高 Sr 同位素比值又说明，其深成岩已含有因地幔俯冲而带入了的地壳物质。这种混有地壳物质的深成岩基最终导致大陆面积的不断扩大，使小岛弧发展成陆

块，日本列岛就是这样发展起来的。

地壳重熔岩石主要为花岗质岩石，地壳重熔一般发生在太古代以后，但根据中国陆壳 Pb 同位素资料，中国陆壳幔—壳分异发生时间较长，自 40 亿 a 到 14 亿 a，并在 34～33 亿 a、26 亿 a、17～16 亿 a 间出现过地壳形成高峰。中国陆壳的重熔和改造是相当强烈的。

在正常的陆壳下面，地壳重熔是不太容易发生的。因为地壳底界的温度很少能超过 500℃～600℃，只有在下列条件下才能使地壳发生重熔和改造。

1. 板块俯冲带会聚边界：俯冲板块把上覆的沉积物带入大陆壳之下，造成 K、U、Th 生热富集，使地热增温率升高（可达 800℃），同时因俯冲形成大量火山喷发和深成岩岩基侵入。喷发和侵入加热和熔融了周围地壳物质，因此在俯冲过程的晚期就有可能产生地壳重熔，日本岛弧及南美安第斯山都有这类岩石（花岗岩）分布。

2. 深断裂[①] 带：在发生深断裂时，由于压力下降，使岩石圈底部岩石的干熔融温度下降，产生基性岩浆并引起软流圈物质上升。上升的基性岩浆导致地壳重熔。在我国南岭地区可以见到与深断裂有关的重熔花岗岩的侵入。

3. 大陆板块会聚边界：以我国青藏高原为例，在 40Ma 前，由于印度和欧亚板块发生碰撞，使青藏高原崛起，碰撞后的板块运动速度为 5cm/a 左右，以此计算，青藏高原地壳至少已缩短了 2000km，而地壳厚度则增加了 1 倍多（最厚可达 73km）。由地壳厚度的温度—深度变化图解可知：随地壳增厚，温度不断上升，造成了从下地壳到上地壳都具有形成花岗岩的温压条件，从而形

① 深断裂即深源断裂，是规模巨大、向地幔深切，并发育时间很长的区域性断裂，是连接地壳—上地幔的通道。

成了广泛的、典型的喜马拉雅期重熔岩浆岩（重熔花岗岩）。大陆板块会聚造成重熔花岗岩分布的例子在北美和欧洲（加里东期花岗岩）、印度、澳洲、非洲和南极（印度洋旋回花岗岩）都有广泛分布。

4. 大陆漂移作用：当大陆地壳移位到大洋地幔上时，由于大洋地幔高热流加上大陆地壳高放射性元素的生热，有可能使下地壳因热聚集而达到重熔温度。我国东南部大面积花岗岩浆活动可能就叠加了这种重熔作用。

019 大陆上地幔

大陆上地幔的上界为莫霍面，下界为 MB670（km）不连续面，此与大洋上地幔一致。根据地震波速模型，可以将大陆上地幔粗略地划分为 6 个层序（图 019－1）。这 6 个“层序”所反映的只是上地幔物质成分分布的空间位置，并不具有从上到下由新到老的时代关系。事实上，软流圈具有较强的活动性，接近软流圈的岩石可能是新近结晶所形成的岩石（层序）。

图 019－1 中上地幔的“层序”为：1. 岩石圈，包括地壳和浅地幔（莫霍面至软流圈）；2. 软流圈，在现代裂谷和造山带内表现清楚且厚度大，含玄武岩浆；3. 上地幔中间层，主要组成矿物为橄榄石、辉石及石榴子石；4.400～450km（或 400km）过渡带，发生橄榄石向类尖晶石结构转化相变；5. 上地幔底层；6.630～690km（或 670km）过渡带，为上下地幔分界面，与 670km 深处的地震波不连续面一致，发生辉石、橄榄石向钛铁矿和钙钛矿结构转化相变。此过渡带之下进入相对稳定的下地幔。

以上 3～6 层属中地幔上层，加上其上的 1～2 层，它们的上下顺序是固定的，但可以缺失其中的一部分“层序”。

上地幔的物质成分，由来自上地幔包体（捕虏体）及实验研究得出。浅地幔（一般小于 220km）的岩石类型为纯橄榄岩、榴



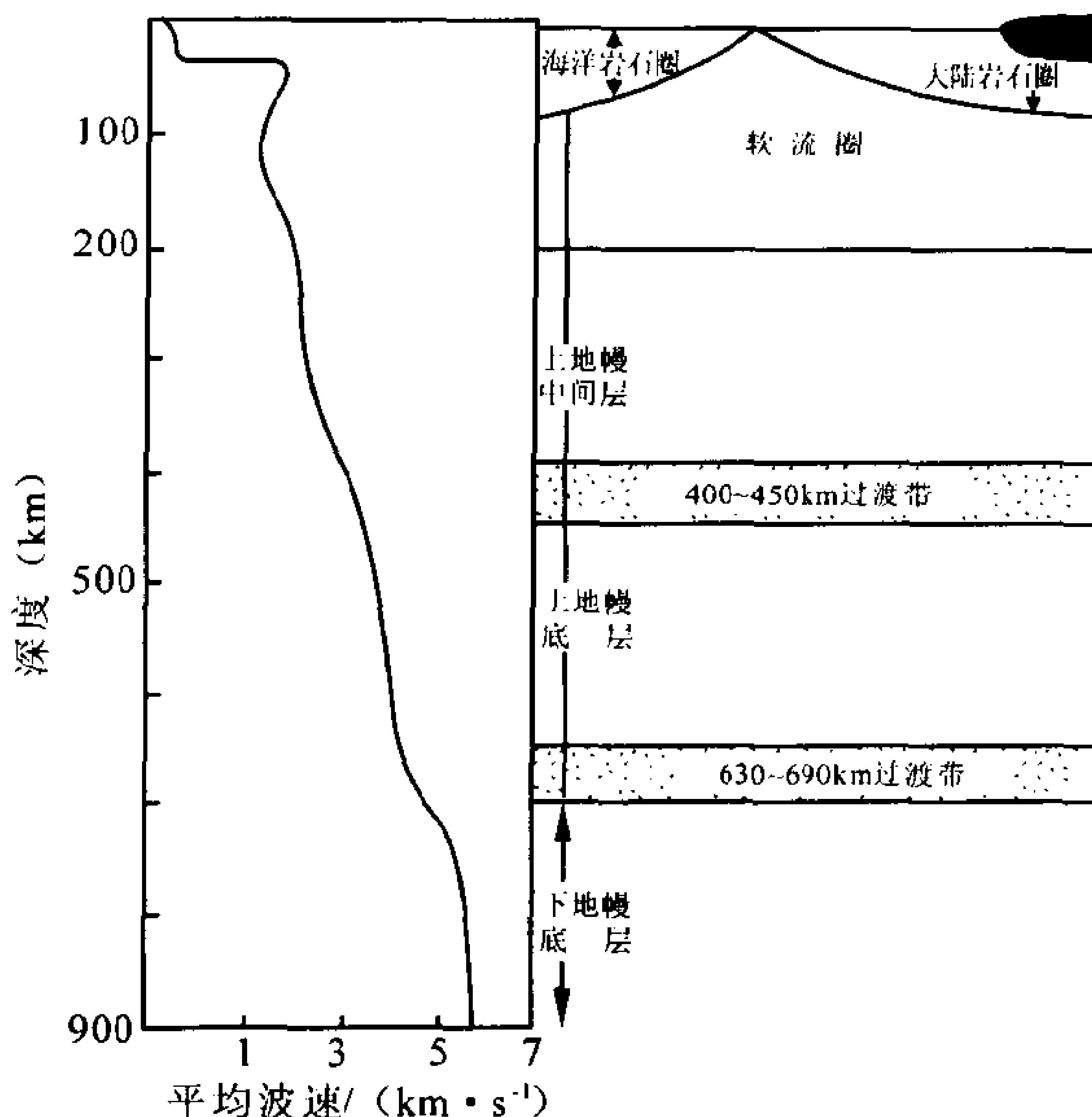


图019-1　上地幔岩石的"层序"模型
（引自杨文采，1999）
左图为上地幔不同层次S波波速变化曲线

辉岩，以及方辉橄榄岩和二辉橄榄岩。但对上地幔的深入研究却表明，多数橄榄岩和纯橄榄岩包体并不能代表上地幔的真实成分。因为这些岩石中的K、Ca、Sr、Ba等元素含量太低，不能产生部分熔融和与玄武岩有相同化学成分的岩浆，而只代表了上地幔熔融产生玄武岩浆后的残留组分。据此，林伍德（A. E. Ringwood，1978）提出了上地幔地幔岩模型概念，即上地幔是由一种称为上地幔地幔岩所组成的。林伍德的上地幔岩即模式橄榄岩是由三份阿尔卑斯橄榄岩和一份夏威夷玄武岩所构成的，这种地幔岩熔融时可产生玄武岩浆，并剩余橄榄岩和纯橄榄岩残留。由于上地幔的地温在大陆和大洋之下相差较大，所以"陆幔"和

“洋幔”的岩石组成也有差异。在大陆前寒武纪地盾之下，上地幔在相当深度上是由含少量榴辉岩析离体的橄榄岩组成的，而在大洋之下，上地幔上部很薄，由方辉橄榄岩和二辉橄榄岩所组成（见图 019 - 2）。

由于中地幔上层 220 ~ 670km 深度的橄榄岩地幔的 V_p、V_s 计算值与相应地震波速观测值不一致，橄榄岩地幔相转变所造成的密度和波速变化与 400km 及 670km 处地震波不连续面的实际变化也不吻合，所以 D.L.Anderson 等（1979，1982）又将地幔分为三层：1. 富集橄榄岩地幔岩组成的上地幔（岩石圈、地幔+软流圈）；2.“亏损”橄榄榴辉岩组成的过渡带（220 ~ 670km）；3.“亏损”橄榄岩和（或）地幔岩组成的下地幔（670 ~ 2900km）。同时 Anderson 还认为，在地球发展早期，原始地幔由榴辉岩（占 20%）与橄榄岩（占 80%）的混合物组成像月球那样（原始地幔可能发生过广泛的熔融，分离出了一个几百千米厚的玄武岩浆海洋），留下一个亏损的橄榄岩地幔，随后又发生岩浆分异，以及玄武岩转变为榴辉岩等一系列事件。由于榴辉岩的密度在 670km 以上比橄榄岩为大，而之下又较橄榄岩为小，经过重力调整，便形成了榴辉岩被夹在上下橄榄岩地幔之间的过渡带，再经过随后发生的地幔交代作用，把原来留存于榴辉岩中的大离子亲石元素和挥发分带到了上覆的橄榄岩地幔，使其成为“富集”型上地幔。如此洋底玄武岩则起源于较深的榴辉岩过渡带，而大陆玄武岩（岛弧玄武岩）则起源于橄榄岩上地幔。

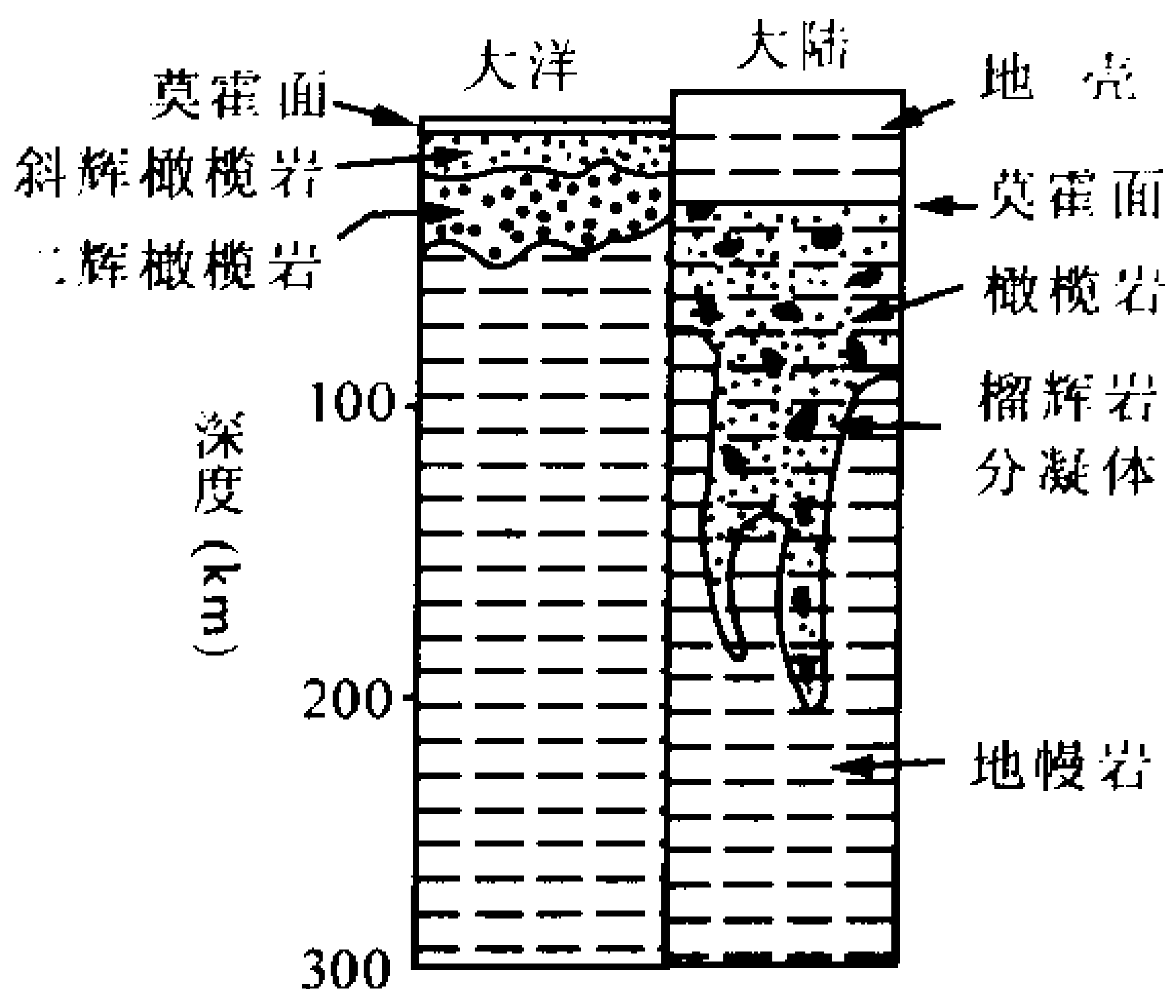


图 019 - 2　上地幔岩石分带模型
（A.E.Ringwood，1979）

学者们普遍认为，上述 Anderson 的地幔“三层模型”属于理想化模型，而贴近实际的模型还需更进一步的实验和探索。

20 地幔的不均一性与地幔演化

地幔（主要是上地幔）的不均一性，最初是由地震波的横向不均一性所认识的。之后到 20 世纪 80 年代，随着全球岩石圈计划的开展，越来越多的资料证实：地幔（圈层）存在着区域化学不均一性和层状不均一性，这种不均一性，目前已发现的主要证据有大地热流、同位素比值、微量元素及地幔等时线现象等。

1. 大地热流：全球大地热流测量表明，在远离大洋中脊及热点的正常大洋区和大陆区，其平均热流值几乎是相等的，为 1.10～1.32HFU，这说明大洋及大陆下面所含的放射性生热元素，其总量是近于相等的，然而在大陆区 56% 的放射性生热元素集中于地壳，而在大洋区 80% 的放射性生热元素集中于地幔。这实际上意味着大洋地幔放射性生热元素较大陆地幔为高，也就是说，大洋区必定有一个更富放射性元素的下地幔存在，原因是形成大洋中脊玄武岩的大洋软流圈是亏损 K、Th、U 等生热元素的，相反大洋热点上的火山岛链又是富集 K、Th、U 等生热元素的，而这些岛链又往往分布于重力异常带上，与深地幔对流作用的上升流动区相联系，说明大洋生热元素来自一个极深的地幔源区即下地幔。相反大陆区必定有一个更贫放射性的大陆下地幔，否则不可能产生所观察到的上述地球热流值。

2. 同位素比值：幔源火山岩的同位素比值可以代表其源区的同位素比值。基于此，随着幔源火山岩 Sr—Nd—Pb 同位素资料的积累发现，同样是来自洋幔的洋脊玄武岩，印度洋中脊玄武岩的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 较太平洋普遍为高；同样是洋岛玄武岩，但不同洋岛玄武岩的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值并不相同，同时洋岛岩石的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 均高于大洋中脊岩石（0.70266）。此外，洋岛岩石所含原始 $^{40}Ar/^{36}Ar$

比值(8000)亦远较大洋中脊岩石$^{40}Ar/^{36}Ar$比值（1600）为高。我国大陆地幔Sr—Nd—Pb同位素研究（朱炳泉等，1992）亦证实，中国东部大陆上地幔有北富集南亏损的源区差异，并存在3个端员组分及7个不同的地幔区。3个端员组分是：五大连池、雷琼南海及腾冲洱海。7个不同的地幔区是：(1) 华南亏损地幔区；(2) 扬子—郯庐混杂地幔区；(3) 闽中低μ略亏损地幔区；(4) 渤海周边亏损地幔区；(5) 华北—东北似原始地幔区；(6) 东北北缘钾交代富集地幔区；(7) 滇西腾冲、广东三水及吉林长白山等古俯冲带物质再循环富集地幔区。

深地幔源岩浆的"富集"、"亏损"演化，还表现在大洋热点与大洋中脊之间火山岩同位素比值的规律性变化上。以冰岛（热点）—雷克亚斯（中脊）火山岩为例，其Pb同位素比值随离开冰岛热点的距离至雷克雅斯中脊呈系统性递减变化规律，在$^{206}Pb/^{204}Pb$与1/Pb关系图上呈线性关系，表明"热点一中脊"间是一个具有不同Pb浓度和同位素组成终端的二元混合体系。

3. 微量元素：地幔不均一性的微量元素证据认识较晚，H. Bougault等（1980）在研究了大西洋北纬25°~63°玄武岩样品的Y/Tb、Zr/Hf及La/Ta比值后发现，将大西洋划分为两个组合：(1) 北纬22°~25°玄武岩La/Ta为18的组合；(2) 北纬36°~63°玄武岩La/Ta为9的组合。这表明：在大西洋的上地幔存在着较大区域的化学不均一性。

4. 地幔等时线现象：地幔等时线现象是地幔长期处于不均一状态的一个重要证据。在大洋海岛近代火山岩$^{87}Sr/^{86}Sr$与Rb/Sr对比图上，太平洋所有海岛岩石的Rb-Sr等时年龄为12亿a。布洛克斯（C. Brooks）将各大洋海岛与冈瓦纳大陆拉斑玄武岩取Rb/Sr和$^{87}Sr/^{86}Sr$比值的平均值进行作图，得到非常好的等时线，年龄为（1620±55）Ma，称为全球Rb-Sr地幔等时线，这就是说，全球区域地幔不均一事件主要发生在17亿a前，可能

主要发生在17~25亿a间，当然全球小范围内的不均一现象可出现在之后的任何时间内。

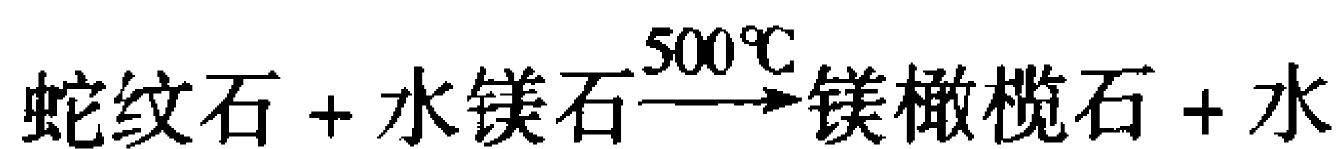
引起地幔组成不均一性的原因很复杂，归纳起来主要有如下几种可能的因素：1. 在地球形成的吸积过程中存在着化学组成的不均一性，因为各类陨石微量元素的原始成分就有较大差别，而陨石（小行星）作为地球组成的一部分其本身就不是完全均一的。2. 在地球形成以后的分异演化过程中，特别是在地球演化早期大陆地壳形成过程中便形成了大陆地幔与海洋地幔的区域不均一性及层状不均一性。3. 大陆发生漂移，使壳幔结构发生重新组合。当大陆漂移到海洋地幔之上时，使其下部的放射能增加，会使壳幔的温度急剧增高，加速物质分异，造成壳幔组成的不均一性。4. 根据地幔对流理论，在地幔中存在着两种对流圈，一是浅地幔对流圈（岩石圈与软流圈之间的对流），另一是深地幔对流圈。在地球历史上，对流圈的形状和中心位置会发生变化。对流圈外层的流动部分往往是相对混合比较均一的部分，由于混合，它将变得愈来愈亏损大离子亲石元素，而对流圈的中心和边角部位则是不流动的，保持了原地幔的特征。当对流圈分化转换时，对流就可以在原对流圈中心部位出现，这就造成了原地幔与亏损地幔的混合，使地幔出现纵向和横向不均一性。

24 地幔与地壳的物质交换

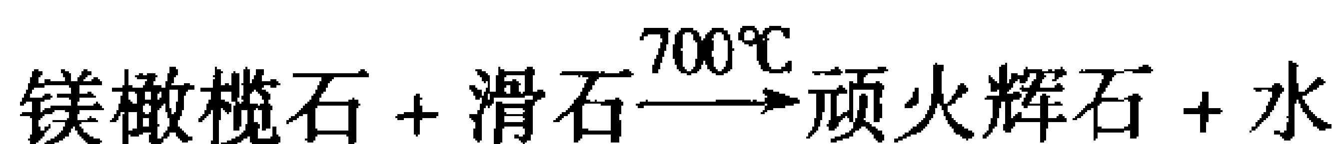
地幔（主要是上地幔）与地壳的物质交换不是单一的从地幔到地壳的物理化学分异（部分熔融产生岩浆），而是壳幔物质相互作用和彼此交换的复杂过程。前已述及，太古宙形成的地壳主要是由TTG岩套及呈带状分布的具有玄武岩成分的绿岩系以及含铁建造所组成的。此与近代主要由偏酸性花岗质岩石所组成的地壳不同，这表明地壳物质在不断更新，并从地幔中不断分异出新的地壳物质。这还可以从不同时代层状方铅矿Pb同位素组成

的测试研究中得知：层状方铅矿 Pb 同位素增长线的$^{238}U/^{204}Pb$ 比值为 7.4～8.1，而地壳岩石$^{238}U/^{204}Pb$ 平均比值近于 11，地幔岩石 Pb 约为 6.7，这表明层状 Pb 同位素既不是地壳中 U、Th 衰变的产物，也不是地幔分异的放射性成因 Pb，而是幔壳物质混合交换的产物，壳—幔物质之间存在一个不断均一化的过程。

现代板块运动为幔壳物质的混合交换过程提供了令人信服的验证模式。由于大洋中脊拉斑玄武岩（MORB）长期与海水接触，而海水中的 K、U、Rb、Sr（海水中 Sr 的浓度为 8×10^{-6}，$^{87}Sr/^{86}Sr$为 0.7095）① 又大量带入洋壳，所以使大洋（板块）的 Sr 同位素以及大离子亲石元素的含量不断增多，当大洋（板块）扩张到与大陆（板块）会聚边界时，由于大洋板块俯冲插入陆块之下，直至软流圈底部而使温度升高，压力增大，故俯冲板块将依次发生从绿片岩到角闪岩再到榴辉岩相的水热交代变质作用，有如下反应产生：


蛇纹石 + 水镁石 $\xrightarrow{500℃}$ 镁橄榄石 + 水


蛇纹石 + 镁橄榄石 $\xrightarrow{600℃}$ 滑石 + 水


镁橄榄石 + 滑石 $\xrightarrow{700℃}$ 顽火辉石 + 水

水分分离后加入到上覆的地幔楔子中，使其熔融温度降低，同时由海水及其沉积物所携带的 K、U、Th、Rb、P 等所形成的交代热液也进入上覆地幔楔子，形成含角闪石、钛铁角闪石、金云母、透辉石、磷灰石等富含微量元素的地幔交代脉。另外俯冲板块的高水压和氧逸度又使处于稳定状态的矿物，如锆石、钛铁矿、磷灰石、石榴石、榍石等被带到地幔更深部位，使转化为榴辉岩相的板块更富集 Ti、Zr、Nb、Y 等元素。与此同时，遭受风

① 海水中 Nd 的浓度仅为 3×10^{-11}，因此洋壳的 Nd 同位素组成不发生变化。

化作用的大陆物质亦被不断带到大洋中形成新的沉积物。据统计：显生宙以来所形成的海洋沉积物的质量约为 3.2×10^{24}g，平均每年形成的海洋沉积物为 3km³。依据 2cm/a 的海底扩张速度，每年至少有 0.5km³ 的大洋沉积物被带入地幔，并与大陆地幔熔融混合形成岩浆，并分别在岛弧和大陆边缘形成钙碱性岩浆岩，在俯冲带内侧形成高铝玄武岩和碱性玄武岩，这种空间分布在我国东部大陆边缘到日本岛弧可以见得到。

经过部分熔融并提取岩浆后，亏损了大离子亲石元素的残留板块，又可返回到大洋底部，与大洋软流圈物质混合，又成为大洋中脊玄武岩的新一轮岩浆源区，使得大洋软流圈和洋脊玄武岩越来越亏损大离子亲石元素，这一过程就是壳幔物质的再循环过程（图 021－1）。

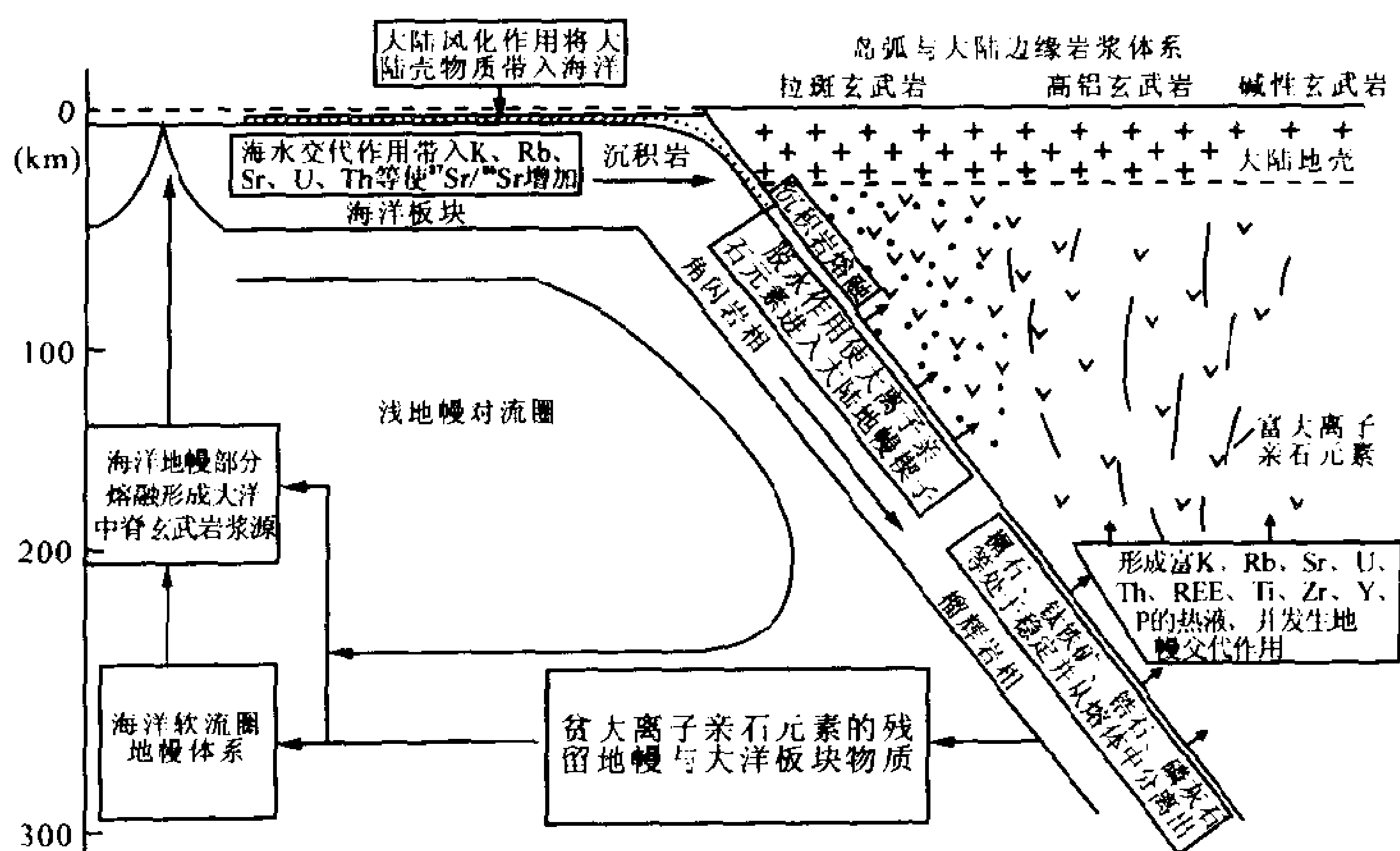


图 021－1　俯冲带地壳与地幔的地球化学循环

（朱炳泉，1984）

应用同位素示踪的方法，也可以显现出壳幔物质的交换作用。在 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 图解上可以看出，岛弧火山岩（阿留申弧）的

数据点基本上都落于大洋玄武岩（MORB）和大洋沉积物（东北太平洋）的混合曲线上（图 021 - 2），另外，岛弧火山岩具有明显比 MORB 高的$^{87}Sr/^{86}Sr$及$^{143}Nd/^{144}Nd$比值，这些均表明，岛弧玄武岩的源区有大洋沉积物的加入。

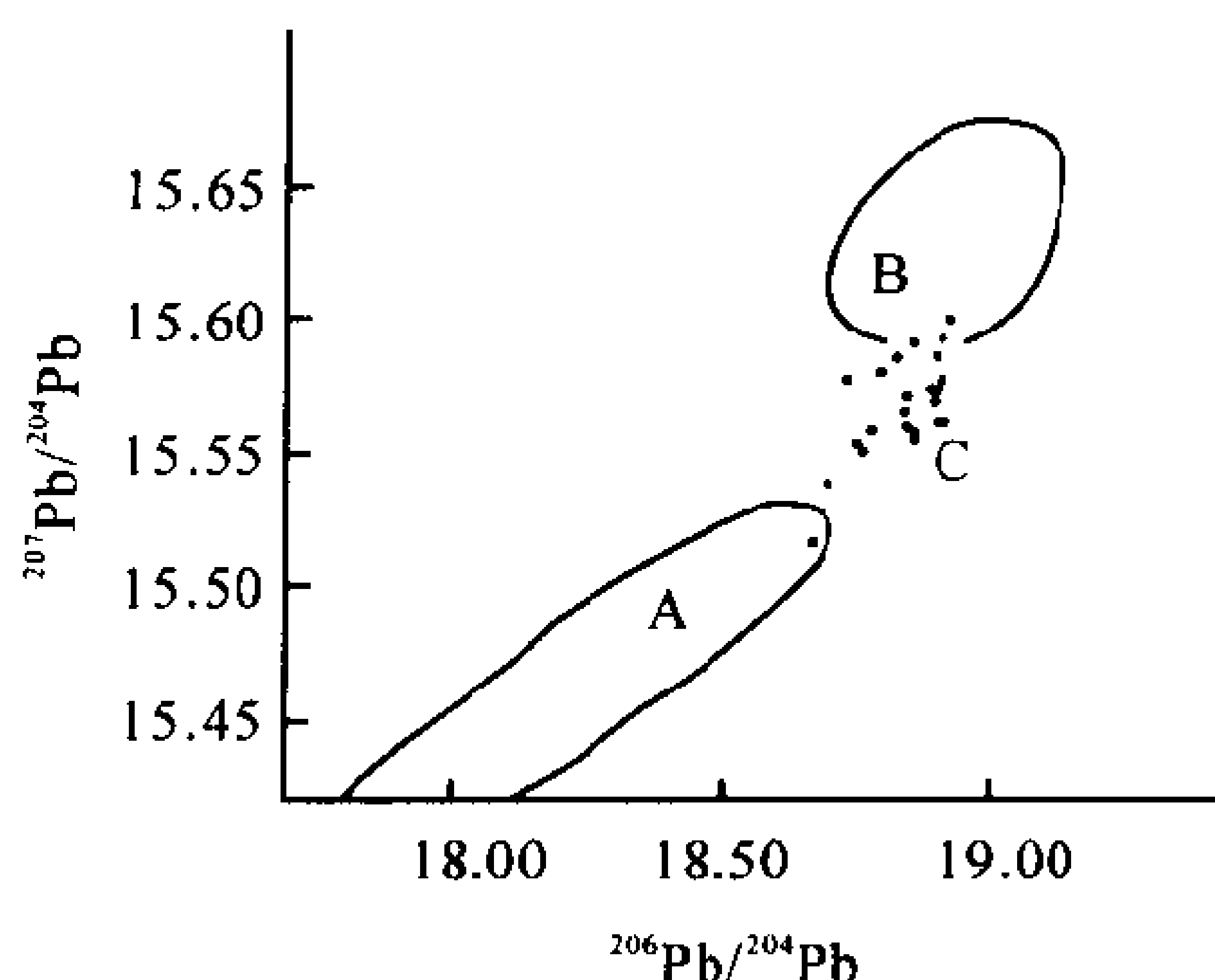


图 021 - 2　岛弧火山岩(C)与 MORB(A)及大洋沉积物(B)的 Pb 同位素图解(S.R.Taylor,1985)

A. 洋中脊玄武岩;B. 太平洋东北部沉积物;C. 阿留申岛弧火山岩

此外，利用$^{87}Sr/^{86}Sr - 1/Sr$关系图还可能区别岩浆上升分异过程中，因陆壳物质加入所引起的同位素变异。

地幔对流循环制约着板块运动，而板块运动还导致了壳幔物质的循环作用，同时也造成了地壳的增生和重熔。所有这一切，它们的动力源都在地球内部，即地球内能，特别是放射能。放射能在地球内外的分布及运动决定了地壳与地幔物质的地球化学循环，也最终决定了地壳与地幔的演化趋向。

022 岩石圈及其基本构造单元

岩石圈是当代地球科学研究的主题和前沿，图 022 - 1 所示的岩石圈即学者们普遍接受的岩石圈。它位于软流圈之上，包括地壳及地幔（岩石圈地幔）。岩石圈的文字表述，按美国地球动力学委员会（1987）国家报告的定义是：岩石圈是“地球的刚性壳层，是由一些能够相互独立运动的离散型板块构成的。概言之，板块的这种组合就称为岩石圈。根据现有模型，岩石圈板块

在洋脊上形成，在俯冲带内沉入地球内部”。可见岩石圈即板块。

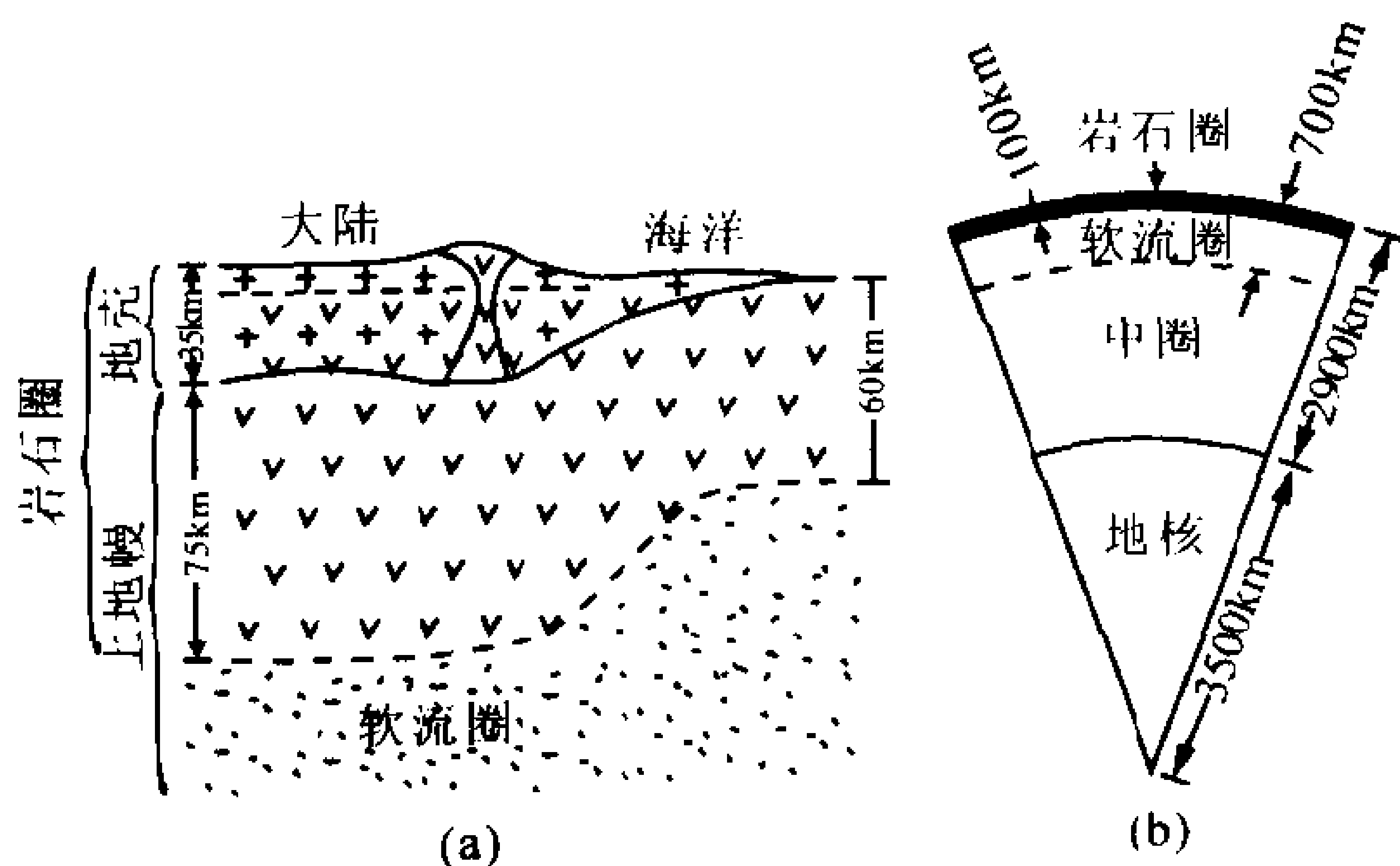


图 022－1　岩石圈结构示意图

岩石圈的厚度变化较大。由地震波得出的岩石圈厚度（地震岩石圈底界）在大洋之下约 45km，在大陆地盾之下约 150km；由地表载荷或卸荷调整计算的岩石圈厚度为 15～40km；由热学热边界层（TBL）定义的热岩石圈厚度为 100km。在力学上岩石圈和软流圈被分别称为强带和弱带。此外，还有学者将（岩石圈＋软流圈）称为“构造动力圈”，将软流之下到幔核边界称为“构造静力圈”（车自成等，1989）。从板块构造学角度看，岩石圈应区分为大陆岩石圈和大洋岩石圈，因为二者有很大不同。典型的大陆岩石圈是指古老地盾及克拉通的岩石圈，而大洋岩石圈则是大洋软流圈物质通过巨大扩张带涌出所形成的，不但缺失花岗质层，而且形成时代也新。此外在大陆岩石圈与大洋岩石圈之间并不存在长期稳定的间断面，但存在有过渡带（大陆边缘）。在过渡带中正发生着各种地质作用和物质迁移，使大陆岩石圈增生。从 20 世纪 80 年代以来对大陆上地幔的研究还认识到，大陆岩石圈是地幔物质分异产生的残渣，通俗地比喻为“地球演化形成的垃圾堆”。之所以如此，是因为地球演化至今的岩石圈，先后经历了熔融的软物质上涌、分异和在表层凝聚的过程，而大陆岩石



圈正是这种化学作用过程形成的边界层。早期最轻的富硅物质（垃圾）离析后形成原始大陆地壳及浅地幔，后续的这种过程使“垃圾堆”增生，并在经历了变形—变质—重熔等一系列地质作用后形成了古老而复杂的大陆岩石圈。正是大陆岩石圈这个“地球演化形成的垃圾堆”，才使学者们在研究地球演化时有了可靠的线索，他们前赴后继地进行了100多年的研究，并将岩石圈划分出了12个主要构造单元（J.N.Brune，1969；K.C.Condie，1982)，它们是地盾、地台、古生代造山带、中新生代造山带、大陆裂谷系、火山岛、岛弧、海沟、大洋盆地、洋脊、边缘海盆及内陆海盆。我国著名地质学家黄汲清等（1980）将岩石圈划分为10个基本构造单元，它们是克拉通（地盾和地台）、大陆被动边缘、大陆裂谷带、大洋中脊、海沟—岛弧系、安第斯型主动大陆边缘、逆冲带、板块碰撞带、转换断层及大洋盆地。

地盾：前寒武纪结晶基底大面积出露的地区，是地壳的稳定部分，很少或没有地震活动。出露岩石的变质程度一般反映其原来的埋藏深度及温压条件。世界上著名的地盾有加拿大地盾、非洲地盾、南极地盾等。

地台：又称陆台，是自形成以来未再遭受褶皱变形的稳定地区。基底也由前寒武纪岩石组成，但其上有未变质的沉积盖层。黄汲清教授把那些规模较小，但活动较大的地台称为准地台，如华北地台，并以此与世界上典型的地台，如俄罗斯地台相区别。

造山带：经受强烈褶皱及其他变形而形成的规模巨大的线状延伸地带。板块构造学认为，造山带是岩石圈板块会聚边界的重要地质标志，是洋盆闭合板块碰撞的直接产物。造山带依形成地质历史可区分为古生代造山带及中新生代造山带。环太平洋带、特提斯带、乌拉尔—蒙古带、北大西洋带及北冰洋带是全球五大造山带。中国造山带主要是环太平洋带及特提斯带的一部分。

大陆裂谷系：是以高角度正断层为边界的长条形谷地，宽

50～75km，长几百至上千千米。裂谷既是大陆崩裂也是岩石圈生长边界构造类型。地球上最长的大陆裂谷系是东非裂谷系，从小亚细亚西到非洲东南延伸达5600km。裂谷系可以产生于任何年龄的岩石中，但年轻裂谷则以其构造不稳定为特征。

火山岛：系指火山成因与俯冲带无关的岛屿，它们产在洋脊上或其附近，或产在大洋盆地内，其构造活动性变化大。

岛弧：是位于大陆边缘与海沟平行排列呈弧形分布的岛链，宽200～300km，是分开大洋盆地和边缘盆地的重要构造地貌单元。近代岛弧主要由年轻的钙碱性系列火山岩和侵入岩组成，火山和地震活动强烈。

海沟：是大洋岩石圈（板块）俯冲消亡的场所，常伴随强烈的地震活动。海沟沿大陆边缘平行俯冲带上的岛弧或火山链构成统一的沟弧系，其深度一般为5～8km，沟内常含有少量来自附近岛弧或大陆的沉积物。

大洋盆地：位于中脊与大陆边缘之间，有薄的深海沉积物和线性磁异常。整体地形比较平坦，但有深海丘陵、海底平顶山和大洋岛屿等。

洋脊：是位于大洋中央部位的线状海底山系，地势高，构造不稳定。洋脊顶部有裂谷系，玄武岩浆从那里喷出。全球洋脊系统从这个大洋到另一个大洋互相联系，总长达80000km。洋脊顶部常为许多转换断层切割，可使洋脊各段移位上千千米。冰岛是现代洋脊惟一露出洋面的实例。

边缘海盆：是大洋地壳的一个组成部分。位于岛弧与岛弧或岛弧与大陆之间，盆内有薄的来自大陆或岛弧的沉积物。边缘海盆广泛发育于太平洋西部。

内陆海盆：是完全被陆地包围的盆地，如里海及墨西哥湾。构造稳定程度属中等稳定—稳定。



023 中国大陆岩石圈的结构特点

中国大陆岩石圈的结构比较复杂，与全球岩石圈相比有其不同的特点。根据我国学者的广泛研究，主要有以下几点（李廷栋，1993；杨文采，1999；黄怀曾等，1994）：

1. 处于全球岩石圈板块的交汇中心位置。它的南面有印度板块，以及澳洲板块的向北俯冲，东部有太平洋板块及菲律宾板块的向西（北西西）俯冲，北部有欧亚大陆核（安加拉）对上述俯冲作用的反作用（图 023－1）。应力场的运动方向以水平方向为主，压应力轨迹（P 轴）显示以藏南为中心，通过南北构造带向中国东部推挤，并呈放射状撒开；张应力轨迹（T 轴）大致垂直于压应力，并向东呈弧形凸出（图 023－2）。压应力中心的挤

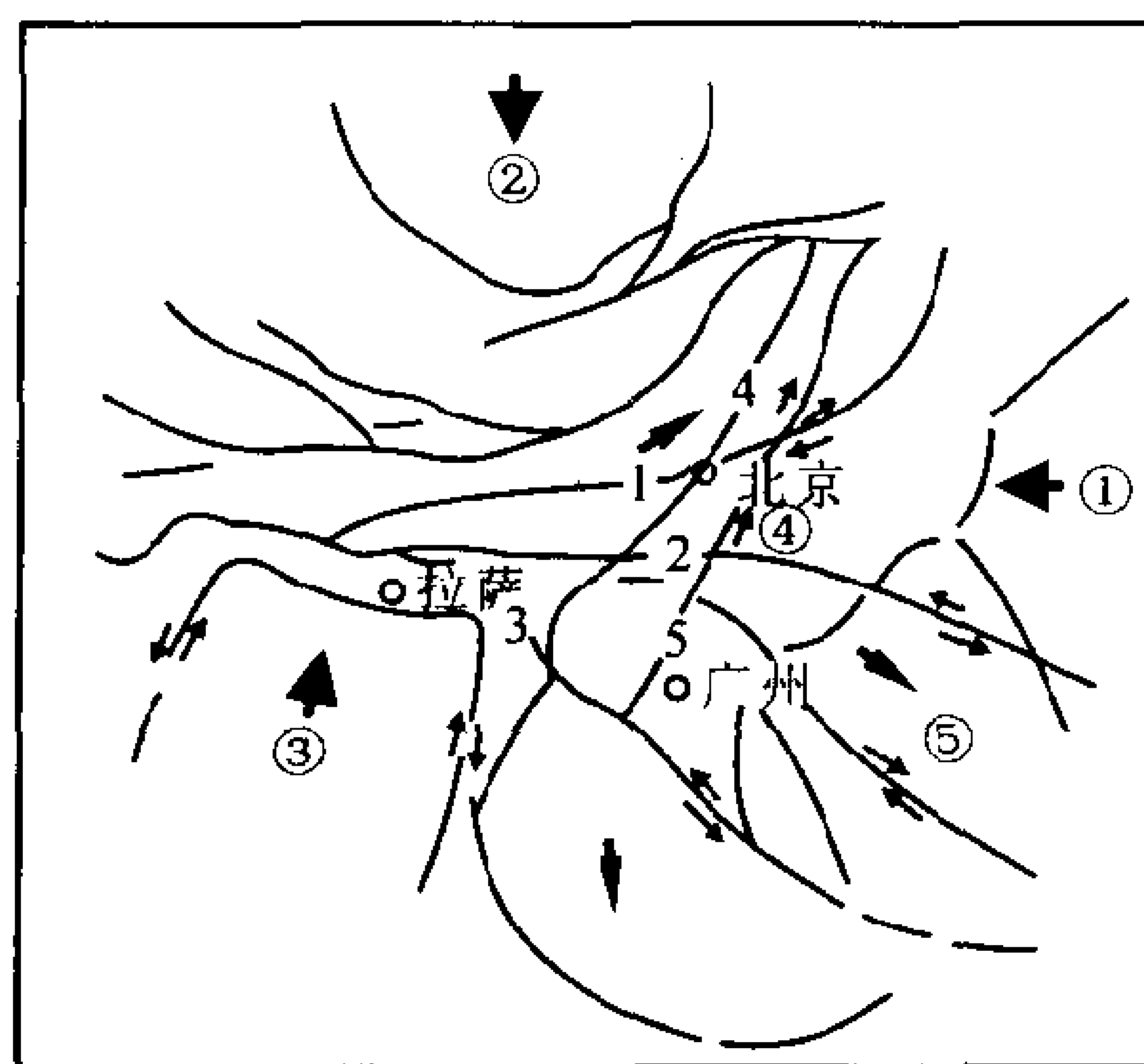


图 023－1　中国大陆岩石圈白垩纪—第三纪板块运动示意图（陈焕疆等，1982）

①太平洋板块；②安加拉（欧亚板块的核心）；③印度板块；④中国板块；⑤菲律宾板块；1. 阴山断裂；2. 祁连—淮阳断裂；3. 金沙江—红河断裂；4. 太行—武陵断裂；5. 郯庐断裂

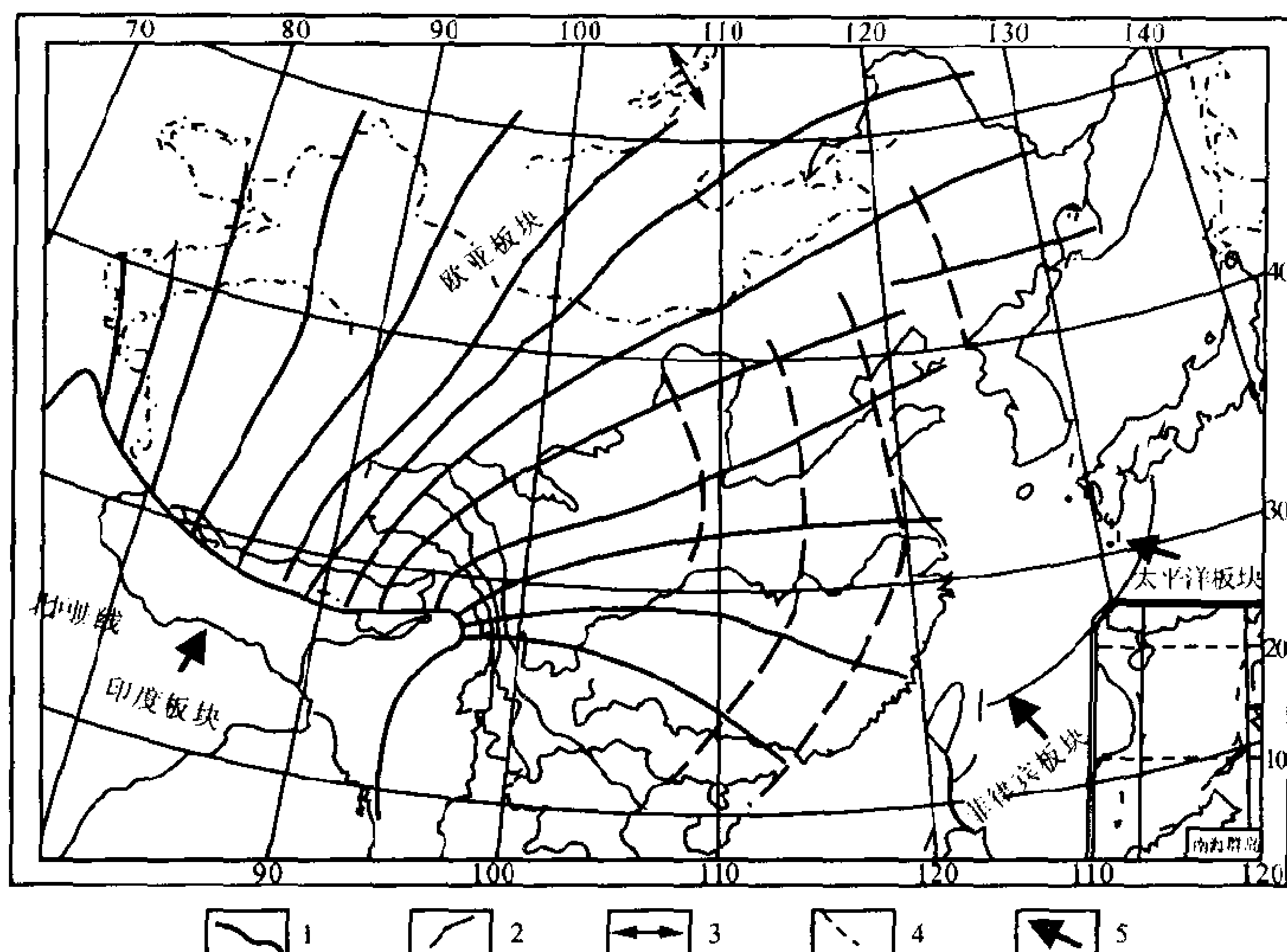


图 023－2　中国大陆岩石圈构造应力图

（黄怀曾等，1994）

1. 板块边界；2. 主压应力（P轴）轨迹线；3. 引张力；

4. 主张应力（T轴）轨迹线；5. 运动方向

压，迫使华北向北东运动，速率为1～4mm/a，而东部太平洋板块的推挤，即太平洋板块以90mm/a速率向NW75°方向俯冲于亚洲板块的千岛—日本岛弧之下形成的挤压，使东北地区呈北偏东逆时针转动，并向西滑移，速率为1mm/a；菲律宾板块的挤压，即菲律宾板块以60mm/a的速率向NW45°方向俯冲于琉球岛弧之下，形成弧后扩张海槽（冲绳海槽）及扩张海盆（南海洋盆），进而从北西（北）方向推挤华南及华北。以上诸构造应力的综合，使中国东部大陆岩石圈发生顺时针旋转，并相对太平洋板块做幅度不大的向北运动。

2. 是最年轻的拼合大陆。与中生代以来全球大陆岩石圈呈

现解体趋势不同，东亚大陆，即劳亚（Laurasia）大陆南沿及特提斯（Tethys）北缘则成了陆块交汇中心，先是塔里木、柴达木、华北、东北陆块等拼入劳亚大陆，然后是印支、拉萨、羌塘、扬子、华南地块的拼入，最后是喜马拉雅造山运动，从而形成年轻的拼合大陆拼入欧亚大陆。这一拼合过程可以从依据古地磁重建的石炭纪全球板块分布图（J. Lin 等，1988）及中生代全球板块分布图（图 023 - 3）得到佐证。这一演化过程一直发展到现代，并将继续发展。

3. 厚度普遍较薄。根据中国地震层析成像图，刘福田教授（1989）等确认，在 220km 深度，中国大陆几乎全为低速区；在 110km 深度，华北、华南及昆仑—西秦岭地区即进入低速区；在全地幔 P 波层序成像图中（Y. Fukao 等，1994），全球最突出的低速区在我国渤海—南中国海一带，中国大陆的大部分地区亦为低速区（杨文采，1999）。这暗示着中国大陆及毗邻海域软流圈上拱，岩石圈厚度减薄。据汪集旸等（1996）计算，中国大陆岩石圈平均厚度为 131km，并西厚东薄、南厚北薄，青藏高原为 120 ~ 140km，鄂尔多斯至四川盆地为 100 ~ 110km，松原—华北平原一般为 80km，但东西部山区可达 120km，东部海域为 60 ~ 70km，华南从沿海的 80km 向西递增为 160km，湖南中部可达 200km。

大陆岩石圈厚度减薄导致热构造及地震活动性增强。中生代以来，中国大陆及毗邻海域所发生的燕山、喜马拉雅山等多期强构造活动及岩浆侵入，以及沿郯庐断裂带及华北裂谷带等所发生的强烈地震活动等，应该说都与软流圈上拱和岩石圈减薄有密切关系。

4. 呈立交桥式结构。在地球物理场上，中国大陆岩石圈呈现出“三横三竖”的立体交叉态势。“三横”指的是近东西向的天山—阴山和昆仑—秦岭—大别深层构造带，以及扬子—华南板块边界的深层构造带；“三竖”指的是近南北向的大兴安岭—太

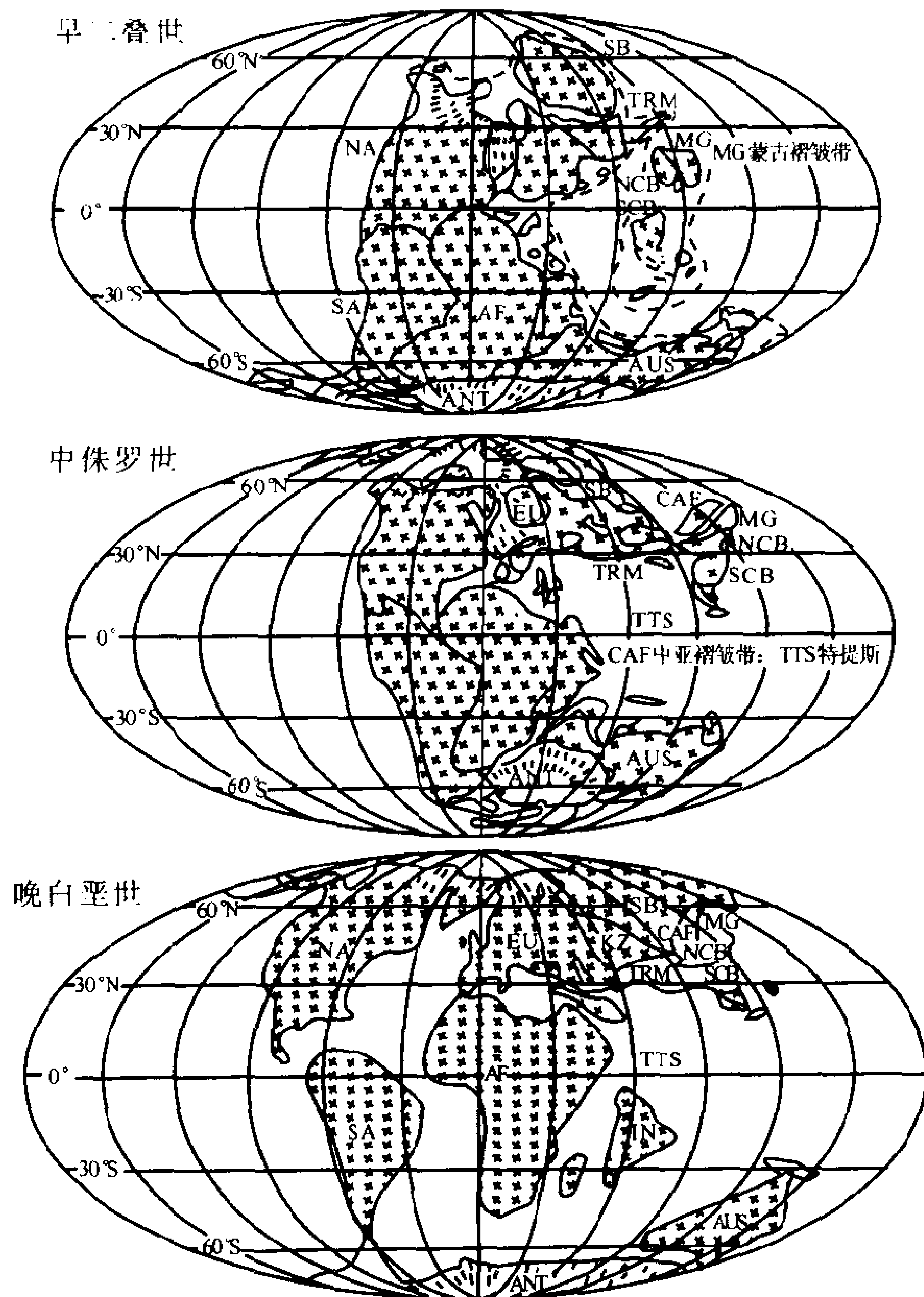


图 023－3　中国大陆拼合的古地磁重建

（程国良等，1995）

QD＝柴达木；QT＝羌塘；KL＝昆仑—秦岭；K_R＝喀喇昆仑；LS＝拉萨；KZ＝哈萨克斯坦；IC＝印度支那；TM＝泰（国）马（来西亚）；AFG＝阿富汗；AF＝非洲；AUS＝澳大利亚；EUR＝欧洲；NA＝北美；SA＝南美；SB＝西伯利亚；IN＝印度；ANT＝南极洲

行山—武陵山和贺兰山—龙门山—康滇地轴深层构造带（重力梯级带），这个带可能是印度板块与太平洋板块在中国大陆相互作用的中和带以及沿海陆缘的深层构造带。学者们认为，近东西向构造带与古生代—侏罗纪构造格局一致，而近南北向构造带则与白垩纪—第三纪以来的构造格局吻合。

此外，根据卫星重力和磁卫星（MAGSAT）图像，青藏高原为一自成体系的构造区。岩石圈结构十分明显地反映出纵横方向的不均一性。



大陆科学钻探

大陆科学钻探，简称CSD，是21世纪科学技术的前沿，是深入了解地球的重要手段，被誉为伸入地球内部的望远镜。它不仅从钻探中可以连续获取岩心以及液体、气体等各类实物样品，而且是21世纪解决能源与资源短缺、环境恶化、灾害频繁等重大社会发展问题的不可缺少的手段，对比较复杂的大陆动力学研究也将起到关键作用。

大陆科学钻探按钻孔孔深可分为浅钻（小于2000m）、中深钻（2000~5000m）及深钻（大于5000m）三类。超过8000m的深钻叫超深钻。国际上已完成的超深孔为数不多，有俄罗斯科拉半岛的SG-3钻孔、德国魏登镇的KTB钻孔及美国奥克拉荷马州的Rogers Bertha No.1钻孔。SG-3孔设计孔深为15000m，因处理孔斜而实际完成孔深为12262m；KTB钻孔设计孔深为10000m，因岩层过陡，孔底温度又高达280℃，实际完成孔深为9101m；Rogers Bertha No.1钻孔实际完成孔深为9583m。

全球大陆科学钻探，依据不同钻孔选址，其所达到的科学目标不尽相同，总的说来，主要有以下几个方面（杨文采，1999；肖庆辉等，1992）：

1. 研究古气候变化。通过钻探直接取得的高分辨率沉积物

及长冰心（极地钻探），可以获得大量古气候渐变和突变的信息。大陆湖泊及沿大陆边缘的海相环境中都有高精度（指时间分辨率）全球性古气候变化的沉积记录，例如通过对贝加尔湖沉积物钻探所获取的岩心中，生物成因的 SiO_2 含量灵敏地反映出湖中生物的繁殖丰度，间接地反映出 25Ma 以来夏季的最高气温，并与氧同位素含量相符。

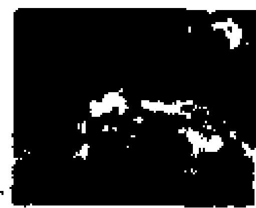
2. 研究沉积盆地演化。了解新老扩张盆地形成的动力学机制（断裂定向机制及断裂运动），以及与古气候变化的关系；寻找新的潜在能源；了解盆地中海相沉积物所反映的海平面变化记录；了解盆地中储存的水资源和油气资源。

3. 研究火山系统和热机制。通过对现代和古代火山系统，比如由国际大陆科学钻探计划（ICDP）资助的对夏威夷现代火山所进行的科学钻探，可以了解火山系统和热机制的 4 个关键问题：(1) 了解夏威夷火山系统由减压及破裂作用而产生的熔岩流动和释放过程；(2) 火山喷发与岩浆侵入的转变关系；(3) 岩浆与热流的耦合系统；(4) 岩石圈中的岩浆侵位。

4. 研究地壳中的流体。可以了解地壳流体的物理化学性质以及控制流体迁移的岩石性质；可以确定地壳中饮用水的可用性和补充量，防止水资源污染。可以了解的其他的主要问题是：地壳内水文状态的周期性变化，地表水向地壳渗透，孔隙流体与地震的关系，不同构造环境中饮用水的局限性，构造变形引发的沉积盆地脱水、成油和流体迁移等。

5. 对地震机制的了解。直接测量断层及其邻区的应力状态，对活动断裂带的物质取样，直接研究断裂处岩石的流变特征，实际了解流体状态，真实模拟发震处的断裂机制，长期监测活动断裂带的流体压力、流体化学、流体温度以及与地震活动性的关系，分析多发地震断裂的内部结构及流体性质。

6. 研究撞击构造与种群灭绝。20 世纪以来的宇宙深空探测



表明，地球平均每100万a就经历一次足以产生直径达20km的陨石撞击事件。虽然陨击坑的地表特征已遭破坏，但至今还能识别出直径为30m到300km，年龄为2000a到20×10^8a的陨击坑120个左右。目前已在50多个陨击坑中实施过科学钻探，其中墨西哥北尤卡坦Chicxulub构造的钻探表明，它是一个外缘直径约300km的多重环形冲击盆地，是全球最大的陨击坑。对意大利古比奥白垩纪—第三纪界线的钻探表明，在薄层粘土中所发现的陨石地球化学标志，提供了陨石撞击可以导致全球性种群灭绝的第一个证据。

此外，大陆科学钻探对矿床成因、会聚板块边界和碰撞带分析以及标定地球物理信息、验证地球物理观测资料、提高地球物理观测水平等方面都具有重要作用。

全球大陆科学钻探始于20世纪70年代，前苏联最早实施，之后美国、德国、法国、瑞典、瑞士、奥地利，以及英国、加拿大、日本、意大利、比利时等国都相继开展了大陆科学钻探。2000年8月4日，中国大陆科学钻探第一井（科钻一井）在江苏东海毛北镇正式开钻，设计主孔深度为5000m，实施时间为5年①。

中国第一口科学深钻井的井址是世界级场址，它位于具有全球地学意义的大别—苏鲁超高压变质带东部。大别—苏鲁超高压变质带是全球规模最大的超高压变质带，被称为“研究板块构造和全球地质变化的天然实验室”，对揭示大陆造山带深部的物质构成与结构构造、重塑超高压变质带形成与折返机制、探索深部流体与生物圈的关系、监测现代地壳运动、为地震发生机制提供新的科学依据等方面都有重要科学意义。

---

① 截至2003年6月科钻一井（主孔）已钻至3100m，揭示了孔区精细的地壳结构。

025 地球动力系统

地球是一个正在演化的极为活跃的行星，现今的地球状态是包括行星地球在内的天体演化过程中的一个阶段。目前对这个阶段（指行星地球）的总体认识是，地球自身具有三圈层（准圈层）结构，即壳—幔—核结构。壳—幔—核界面之间可能是物质分层的化学界面，其形成与地球早期的物质熔融事件有关；壳—幔—核内部的各界面则主要是物理界面，其形成主要与不同深度的温压条件及矿相变化有关。界面附近有活跃的边界层，在动力系统中有重要作用。从动力学角度可以把上述壳—幔—核结构区分为五个圈层，即岩石圈—软流圈—中幔圈—外核—内核，以及呈纵向穿层分布的流体通道网络，其中软流圈与中幔圈之间的过渡层即MB670km附近有控制地幔对流的重要作用，中幔圈与液态外核之间，即CMB2900km附近的核幔边界层是活跃的热边界层和化学边界层，超级幔柱在这里开始形成。

以幔柱（超级幔柱）和MB670km至CMB2900km之间的地幔对流为主要研究对象的动力学（系统）称地幔动力学；以地核生长构造和内核差速旋转为研究对象的动力学（系统）称地核动力学；以岩石圈板块构造为研究对象的动力学（系统）称岩石圈动力学。岩石圈动力学、地幔动力学和地核动力学是地球内部运动动力学的三大子系统，其中岩石圈动力学是优先研究的主体，因为大陆地壳蕴含着丰富的、特别是地球地质早期演化的历史记录。岩石圈动力学还可再划分为诸如大陆动力学、大洋动力学、造山带动力学和盆地动力学等次一级子系统，而这些次一级子系统，根据地质作用性质又可再细分为构造动力学、岩浆动力学、沉积动力学、变质动力学、地质流体动力学、成岩动力学和成矿动力学等更次一级的子系统。全球动力学就是要从地球整体上揭示和综合这些不同等级子系统的统一演变过程，它们之间的控制

和反馈机制，以及物理和化学作用与驱动能量之间的内在联系，建立起地球及各主要构成部分演化的定量模型。此外学者们还认为应该有与地球旋转变化有关的旋转动力学。我国学者李四光很早就提出了地球自转速率变化以及与其相关的地球内部物质运动是产生地壳运动主因的认识。近年来不少学者从不同角度也注意到了地球坐标与其自转轴之间的联系，并指出板块在低纬度的运动速度比高纬度相对较快、地球活动带是不同板块之间不同加速度的缓冲带、大地水准面从属于地球旋转速度、科里奥利力的赤道一极区梯度是转换断层的成因、特提斯带和太平洋带的方位与黄道的倾角有关等论点。

目前地球科学已认识到了上述地球内部圈层及外部圈层所存在的不同的物质运动虽然千差万别，但只不过是由于地球内外各圈层的物质组成不同，力学性质不同，空间及时间尺度不同而

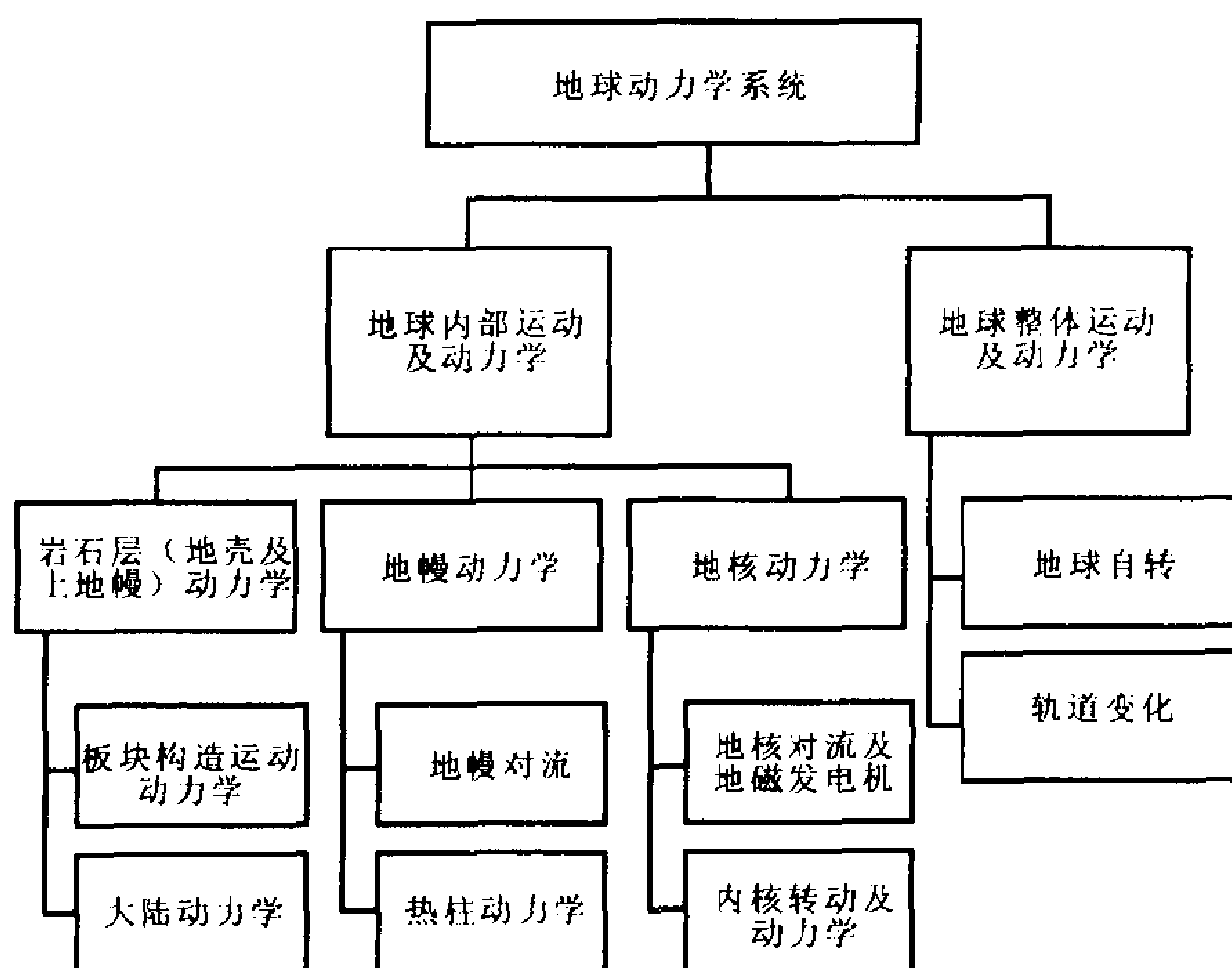


图 025-1　地球动力系统框架
（引自傅容珊等，2001）



已，并没有本质上的差别。图025－1所给出的地球动力学理论框架就是目前描述上述各圈层物质运动模式的一种基本框架。框架中的动力学问题都是地球科学的一级问题，是当代地球科学研究的热点，学者们从这些热点问题出发，不断深化对行星地球的整体认识，并建立起新一代全球动力学（动力系统）和大陆动力学（动力系统）的典型范例。

二、地球的海陆变迁

026 现代地球地表图像

现代地球表面有两大地貌单元，一是陆地，一是海洋。六陆（欧亚大陆、非洲大陆、北美大陆、南美大陆、澳洲大陆和南极大陆）四洋（太平洋、大西洋、印度洋、北冰洋）是地球的基本面貌，其中大陆（陆地）是人类生存的第一环境，海洋是第二环境，第三环境是大气层，第四环境是太空。现代人类正在向第二环境过渡，并通过第三环境向第四环境进军。从环境的相互包容关系看，第二环境即海洋环境总是紧紧地环抱着陆地环境（第一环境），形成了统一的全球大洋，称为世界洋，但没有统一的全球大陆，也就是说，是海洋包围着陆地而陆地并没有分割海洋。因为大陆是由不同陆块（地块）镶嵌所组成的，被称为“积木式地球”，这种由海洋和陆地积木而成的结构决定了全球岩石圈运动、演化的基本格局，也是地球海陆变迁的基本构架。

根据20世纪的观测数据，地球表面总面积为 $5.10 \times 10^8 km^2$，其中陆地面积为 $1.48 \times 10^8 km^2$，占地球总面积的29.2%，这之中65%以上的陆地又分布在北半球；海洋面积为 $3.62 \times 10^8 km^2$，占全球总面积的70.8%。在地球的不同半球上，海洋面积都比陆地面积为大，以南半球和西半球最为显著。

从纬度分布看，北半球的中高纬度陆地广布，60°N～70°N之间陆地分布连绵不断，但南半球的中高纬度56°S～65°S之间，除一些岛屿外，均为浩瀚的海洋。从两极看，北极为北冰洋，南极为南极大陆，除海陆分布差别悬殊外，如果将北极向东转动

100°经度，两者重合，南极大陆几乎刚好把北冰洋堵满。科学家对此还没有圆满的解释，有待进一步研究。从陆地（大陆、大洲）展布趋势看，除南极和澳洲大陆外，其他大陆都大致为南窄北宽的三角形，北美与南美、欧洲与非洲、亚洲与澳洲大陆都有南北对称的分布特点。如果以东经45°纬度0°为原点将地表旋转180°，则绝大部分陆地落入海洋，这种海陆分布形式不是偶然的。此外，每一对大陆或大洲之间又都隔着一个较大的海域，海域中不仅岛屿众多，且火山地震频繁。更为特别的是，大西洋两岸、欧洲与非洲西海岸、北美洲与南美洲东海岸，其两岸轮廓的曲折大势基本吻合，仿佛原先是拼合在一起的“积木块”，只是后来由于地球变动等原因，“积木”才彼此分离开。

陆地上的最高点是喜马拉雅山的珠穆朗玛峰，海拔8848.13m，这是1975年的测量数据，但根据近年调查，喜马拉雅山（中段）以3～5mm/a的速度在隆升，至今其高度数据为多少是当今科学家都想测量的。陆地最低点是位于西亚约旦河谷中的死海，其湖面低于海平面392m（海拔为－392m）。陆地上最深的大峡谷是我国的雅鲁藏布大峡谷，不是美国的科罗拉多大峡谷，1998年的测绘数据为：雅鲁藏布大峡谷的平均深度是2673m，最深为6009m，平均宽度113m，最窄处仅35m，长度为504km。

全球陆地通常分为山地、高原、平原、丘陵及盆地。全球山地有两条巨大的高山带，一条是环太平洋沿岸高山带，该带呈南北向展布，太平洋东岸为北美和南美大陆西部的科迪勒拉—安第斯山系，西岸为亚洲和澳洲大陆太平洋沿岸山脉，以及东亚岛弧上的一系列山脉；另一条是横亘欧亚大陆中南部及非洲大陆北缘的高山带，该带呈东西向展布，包括阿尔卑斯山及其分支、阿特拉斯山、兴都库什山、喀喇昆仑山、喜马拉雅山、阿拉干山等，以及安纳托利亚高原及伊朗高原南北两侧的山脉。以上两大高山

带在东南亚巽他群岛南部（岛弧）彼此相接。全球高原也有两大类别，一类是以古老陆块为核心的高原，主要有非洲高原、中西伯利亚高原、蒙古高原、阿拉伯高原、德干高原、巴西高原、澳大利亚西部高原等；另一类是镶嵌于年轻造山带之间的高原，主要有青藏高原、伊朗高原、安纳托利亚高原以及分布于科迪勒拉山系中的山间高原等。全球平原面积广阔，在地理分布上也主要有两类，一类是分布于大陆中部，而东西为高地或高山的“中间平原”，如北美大陆中部的奥里诺科平原、亚马逊河平原和拉普拉塔平原，以及澳大利亚中部平原等；另一类是欧亚大陆上的平原，主要有分布于东西向高山带北侧的中欧平原、东欧平原、图兰平原、西西伯利亚平原等，以及分布于大江大河下游的平原，如美索不达米亚平原、印度平原、恒河平原及我国的东北平原、华北平原、长江中下游平原等。全球的丘陵和盆地，在地理上具有分散分布的特点，并多与高原、平原相间分布，如中亚的哈萨克斯坦丘陵、我国的四川盆地等。

以上所述均为现代地球的陆地图像。这些陆地（大陆）大都是以往各国地球科学家工作的重点，已有130多年的研究历史。然而由于大陆所囊括的地球的广度和深度十分有限，陆地所占地球面积较海洋小得多，所以虽然有历经百年以上的研究，但似乎始终处于就事论事的经验世界，并未描绘出地球海陆变迁的真实面目。直到20世纪50年代，当研究进入到占全球表面积71%的海洋后，才真正洞开了地球海陆变迁的大门，为地球科学带来了新探索、新追求和新希望。

27 南极与北极

地球的南北极通称极地。北极位于地球的最北端，南极位于地球的最南端。20世纪以来对极地综合科学考察的大量事实表明，由于两极所处的特殊地理环境，所以极地的存在和演变与全

球气候（温度升高、冰架崩裂、冻土带北移）、臭氧空洞、生态环境、资源开发和人类命运休戚相关，是发现全球环境变化的敏感地区。

南极：通常所说的南极是泛称，有点状和面状地理两层含义。它的点状地理含义是南极点（South pole），即南半球纬度的最高点（90°S），也是地球上所有的经线在南端的一个汇聚点，它位于南极大陆中部，与周围地理环境没有什么差别。在南极点上东西南方向完全失去了意义，只有一个朝北方向。南极的面状地理含义有南极地区、南极大陆、南极洲及南极圈的不同。南极圈（Antarctic Circle）是 66° 33′ S 以南的区域，而南极地区（Antarctic）则是《南极条约》（1959）适用的范围，即"南纬 60°以南地区"，包括所有海洋、岛屿和陆地，总面积 6500km^2。南极大陆是除周围岛屿以外的陆地，面积 1239 万 km^2。大陆基岩平均海拔 410m，而基岩之上冰盖的平均厚度则高达 2350m。南极大陆是全球惟一被太平洋、大西洋、印度洋呈封闭包围的大陆，孤立于其他大洲之外。南极洲与南极大陆的不同是，除包括南极大陆外还包括周边的大小岛屿，总面积约 1410.8 万 km^2。南极洲是地质学研究的重点地区，遗憾的是基岩出露面积较小，仅占 2%，这 2%的基岩主要出露于横贯南极山脉、南极半岛及南极大陆周边。依据基岩分布可以将南极大陆划分为三个大地构造单元：1. 东南极地盾，由前寒武纪结晶基底组成；2. 横贯南极山脉褶皱带，由发生于早古生代的构造运动——罗斯造山运动所形成，褶皱带之上的盖层由泥盆系—侏罗系组成，其中石炭纪及二叠纪早期曾出现过长时间的冰期，冰碛岩广泛分布；3. 西南极褶皱带，由发生于晚古生代及中生代的构造运动所形成。此外在南极半岛与横断南极山脉之间，在晚古生代至新生代期间还形成了威德尔—阿蒙森—罗斯海盆，以及一些裂谷及横断南极的断层。



在魏格纳大陆漂移说中，冈瓦纳古陆的核心位置是南极大陆，“南极大陆在冈瓦纳古陆中起到了塞缝石的作用”，所以受到了地学界的广泛关注。特别是20世纪50年代以后，科学界对整个南极大陆及周围海域有了比较广泛的了解，不仅在石炭—二叠纪含煤岩系底部找到了大量冰碛层及显著的冰川遗迹，而且还找到了南方大陆上典型的舌羊齿植物群，以及早二叠世淡水爬行动物中龙、三叠纪陆生爬行动物水龙兽动物群等，进一步说明，早石炭世之后包括南极洲在内的统一冈瓦纳大陆是客观存在的，直至白垩纪它才开始分裂解体，新生代澳大利亚才与南极洲最后分离，并各自成为独立的大陆。红海出现后阿拉伯半岛才脱离了非洲。另外南磁极的位置是不固定的，它大约以10km/a的速度向北移动，自1909年所测出南磁极的精确位置为72°25′S、155°16′E之后，到1965年，南磁极已移位到66°30′S、139°54′E处，到1975年，其位置又移到了65°48′S、139°24′E处，1987年南磁极的位置已移到了距阿黛利海岸约250km的南大洋中了。此外近年来在南极还发现有大量来自火星的火星陨石，它们大都出露在南极山坡的冰面上，火星陨石连同已发现的月球陨石都是解开宇宙之谜的重要物证。毋庸置疑，南极是科学考察的圣地和天然科学实验室。

北极：是北极地区的简称，通常把北极圈即66°33′N以北的区域视为北极地区，而狭义的北极是指地轴北端与地面的交点，即北极点，位于北冰洋中，其纬度为90°N。北极点是所有经线在地球北端的共同交点，那里只有向南的方向，没有其他方向。太阳终日不没，或终日不出，形成永昼与长夜的奇景。由于北极点上的浮冰漂泊不定，所以至今尚未建立起象征北极点的实际标志。

北极的中心地区是轮廓近似圆形的北冰洋。它也是地球上惟一几乎全被冰雪覆盖的大洋，总面积1478.8万km^2，约占北极地

区总面积的2/3，全球海洋总面积的4.1%，平均水深1296m，是全球4大洋中最浅也是最小的海洋。北冰洋四周的陆地为环抱北冰洋的亚洲大陆、欧洲大陆和北美大陆的自然延伸部分以及北冰洋中众多的岛屿。岛屿均属大陆岛，大多分布于宽阔的陆架区，其数量仅次于太平洋。最大的岛屿为格陵兰岛（丹麦），最大的群岛为北极群岛（加拿大）。岛屿和陆地大多覆盖有厚厚的冰层即冰盖，北冰洋面上自由漂浮的冰山就是从陆地冰盖崩裂下来的巨型冰块。1912年，当时最豪华的客轮“泰坦尼克号”第一次出海航行，就不幸碰上了自北冰洋漂浮于大西洋的冰山而沉没了。

北冰洋洋底地形比较复杂，其突出特点是有非常宽阔的大陆架，面积达440万km^2，约占北冰洋总面积的1/3。洋底中部有两条平行分布的海岭，即罗蒙诺索夫海岭和门捷列夫（阿尔法）海岭。罗氏海岭大致从西伯利亚群岛穿过北极附近，延伸至格陵兰岛北岸，“岭脊”距海面1000~2000m，门氏海岭从亚洲一侧的弗兰格尔岛延伸至格陵兰岛一侧的埃尔斯米尔岛附近，与罗氏海岭汇合。据有关研究，这两条海岭并非大洋中脊，可能是洋底被构造断裂复杂化的褶皱山脉，也可能是从欧亚大陆边缘分裂出来的无震海岭。北冰洋的大洋中脊（南森海岭）起自勒拿河口，经靠欧亚大陆一侧的南森海盆到格陵兰岛北侧，与穿过冰岛的北大西洋海岭相连接，长约2000km，宽约200km。中脊上裂谷发育，有平行于轴向延伸的磁异常条带（24号），因而它是全球大洋中脊的组成部分，扩张速率为1cm/a。由于宽阔大陆架的周缘为周边大陆的自然延伸，所以四周均由大陆地壳组成（被动大陆边缘），但深海盆地则主要由大洋地壳组成。

北冰洋是北极的核心组成，周边为陆地所包围，所反映的是海洋特点，是“洋”；相反，南极的核心组成是南极大陆，周边为海洋所包围，所反映的是大陆特点，是“陆”。由于北极地区

是“洋”，是一块巨大的洼地，洼地面积约 1478.8 万 km^2，而南极是“陆”，是一块巨大的隆起，隆起面积约 1410.8 万 km^2，南隆北洼正相反对。如果把北极（地区）向东转动 100 经度，则北南两极重合。非但重合，而且两极地形还存在着参差对应关系，如把南极洲的南极半岛移到格陵兰东海岸的海渊出口处，那就正好适得其所；若把整个南极洲按上述经度（100°E）转动，就会出现正好将北冰洋填满的奇迹。当今的科学家们都相信，这绝不是偶然的巧合，很可能隐藏着一种与地球运动和演化有关的内在联系，但这又是一种什么样的科学联系呢？

028 海底地形与海洋环境分区

海底地形是地球内动力作用的直接反映，是研究地球海陆变迁的重要根据。然而了解海底，对海底进行地形调绘，要比对陆地地形调绘复杂。目前应用最多的、最现代化的海洋探测技术，除全球定位系统（GPS）外，主要有多波束测深技术、旁侧声纳以及海底地形自动测绘系统。当然这些都是间接测绘，而直接观测则主要是依靠深潜器。深潜器能直接观察海底地形细节，并能亲临海底观察奇妙的海底世界。目前世界各国有数以万计的深潜器在服役。1994 年，美国阿尔文（Alvin）号深潜器在北大西洋深潜中直接观测到了 1912 年的冰海沉船——泰坦尼克号，在国际上引起了轰动。

根据 20 世纪 70 年代以来的现代海洋测绘资料，海底地形的三大基本轮廓及两大环境分区示于图 028 - 1 中，并依据水深将海洋从海岸线到大洋中心依次划分为滨海、浅海、半深海和深海 4 种海洋环境，与其相应的海底地形则分别称之为海岸带、大陆架、大陆坡、海沟、大陆基、深海盆地、大洋脊（图 028 - 2）。大洋脊是淹没于海洋中的巨形山脉。现自大陆边缘至大洋盆地依次说明海洋环境分区的简要地质特征。

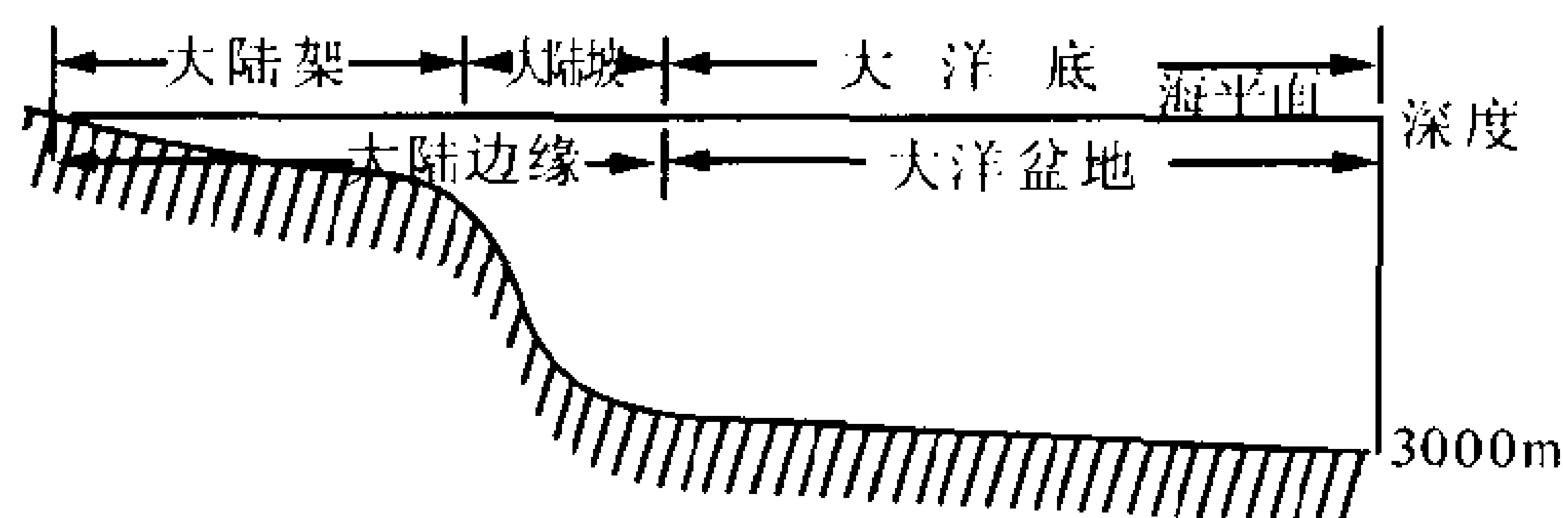


图 028－1 海底轮廓示意图

大陆边缘：是大陆与深海洋盆之间广阔的过渡地带，对大陆来说即大陆边缘，对大洋来说即大洋边缘。大陆—大陆边缘—洋盆都是地球地貌的一级单元。从地形组成看，狭义的大陆边缘主要指大陆架和大陆坡，而广义的大陆边缘还包括滨岸陆地、大陆基、海沟—岛弧—弧后盆地。大陆边缘沿大洋周边绵延约 350000km，总面积约 8000 万 km^2，占全球表面积的 15.9%，占大洋总面积的 22%。大陆边缘在各大洋所占比例为：大西洋和印度洋占 33%，太平洋不到 10%。依据大陆边缘的大地构造学观点通常将其划分为两个基本类型，即大西洋型大陆边缘和太平洋型大陆边缘。

大西洋大陆边缘：也称被动大陆边缘、稳定大陆边缘、离散大陆边缘、拖曳大陆边缘等，由大陆架、大陆坡和大陆基组成(图 028－2 右侧)，地形宽缓，无海沟发育。被动大陆边缘是在大陆分裂、新洋张开的过程中发育起来的，主要分布于新生大洋的周缘，如大西洋周缘（小安的列斯岛弧、斯科舍岛弧除外）、印度洋周缘（印度尼西亚岛弧除外）以及北冰洋和南极洲周缘。被动大陆边缘的地壳自陆向洋逐渐减薄，边缘的沉积层记录了大陆裂离、大洋扩张演化的信息。

太平洋型大陆边缘：也称活动大陆边缘、主动大陆边缘、汇聚大陆边缘等。活动大陆边缘主要分布在太平洋周边及印度洋北缘，其陆架狭窄、陆坡陡峻，陆基被深邃海沟所取代（图 028－2 左侧）。与被动大陆边缘位于漂移大陆的后缘相反，活动大陆

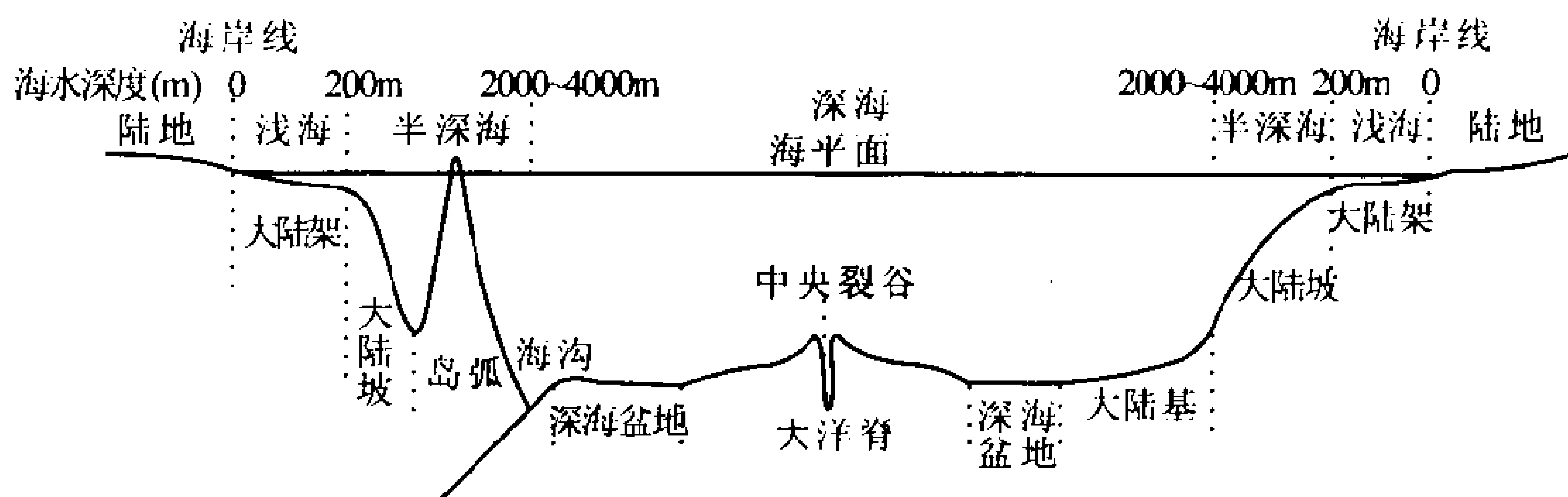


图 028－2 海洋环境与海底地形单元

边缘位于其前缘，属板块俯冲边界。由于板块的俯冲作用，形成了海沟，也形成了与海沟共轭的火山弧。火山弧可以是有边缘海的岛弧，即海沟—岛弧—弧后盆地系列，也可以是无边缘海的陆缘弧，即海沟、岛弧系列，后者又称安第斯型大陆边缘。边缘海弧后盆地为次一级的洋壳生长带和扩张带，弧后盆地陆侧可视为次一级被动大陆边缘，如我国南海、日本海靠大陆一侧。可知：活动大陆边缘不仅有挤压构造，而且有引张构造。根据学者们的共识，全球大洋沟—弧系中共有 30 条海沟，其中太平洋 20 条，大西洋 4 条，印度洋 6 条。

活动大陆边缘是地球构造活动最活跃的地带，是地震、火山的高发区，不仅地形高差大、热流值变化急剧，而且具有最显著的重力异常。一般认为，板块俯冲作用是导致沟—弧—盆发育以及地震、热流、重力变化的深部根源（图 028－3）。

除以上被动及活动大陆边缘外，有的学者还划分出了转换型（或剪切型）大陆边缘，其形成与转换断层的走滑有关。这种边缘可以是被动的，如几内亚湾北缘，也可以是活动的，如加利福尼亚沿岸。

大洋盆地：也称深海盆地，是海洋的主体。位于大洋中脊与大陆边缘之间，太平洋和大西洋的大洋盆地被洋中脊一分为二，成为两个大洋盆地，而印度洋则被三叉洋中脊分为三个大洋盆



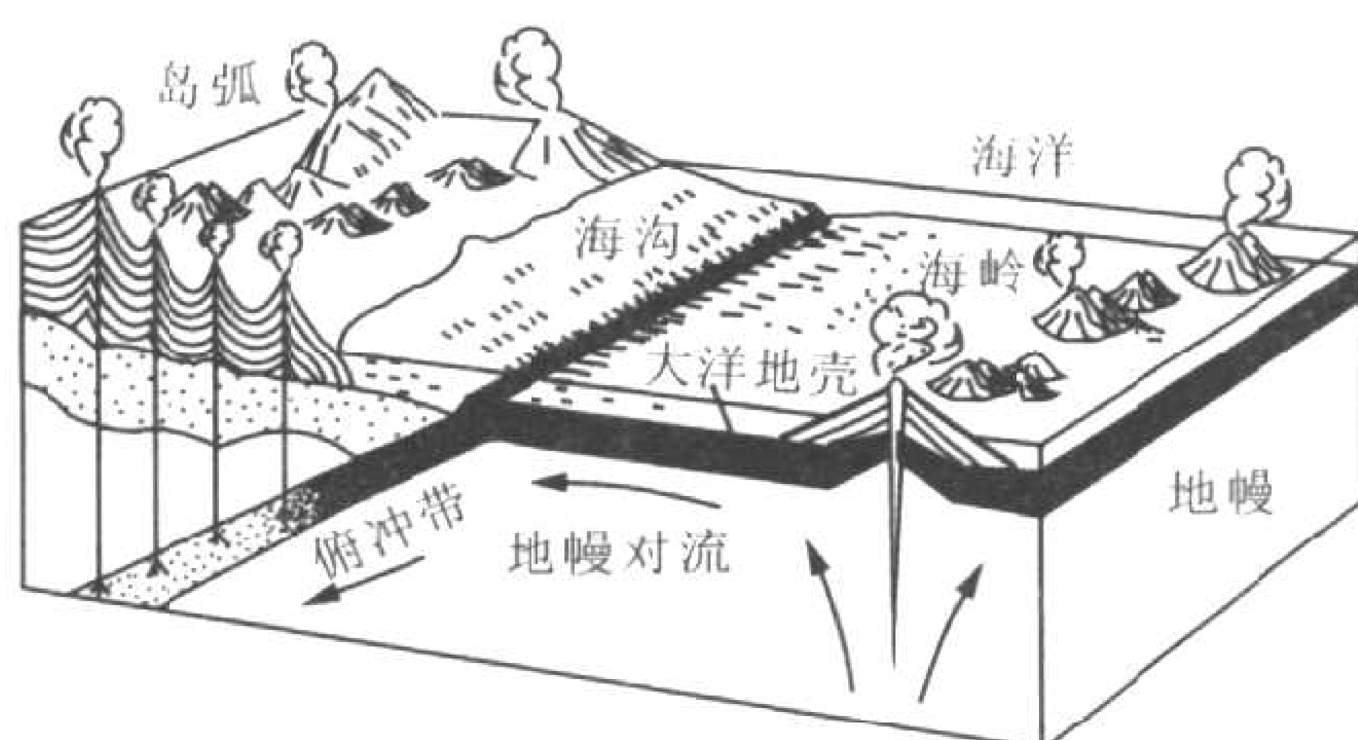


图 028-3　活动大陆边缘与俯冲带

地。大洋盆地倾斜度很小，在 0°20′～0°40′之间。

大洋盆地还可被海岭等正向地形所分割，构成水深 4000～6000m 的海底洼地——海盆（外形近等轴状）及海槽（外形长而窄），海盆底部发育深海平原、深海丘陵等。深海平原由起伏的玄武岩基底和较大厚度的沉积物披盖而成，坡度小于 0.1%，是地球上最平坦的区域。据统计，全球大洋中约有 50 个海盆。若海盆沉积物覆盖无几，底部地形实际为基岩（熔岩流）控制，则构成深海丘陵。深海丘陵常分布于深海平原向大洋中脊过渡一侧。由于太平洋边缘发育有深海沟，来自大陆的沉积物难以铺覆成深海平原，故太平洋中以深海丘陵为主，约占洋底面积的 80%，而大西洋中因无海沟阻碍，所以深海平原发育。

长条状的海底高地称海岭或海脊，如太平洋中的夏威夷群岛。洋盆中的海岭几乎没有地震活动（无震海岭）。属火山成因的海岭称海山，海山多孤立地散布于洋盆中，规模较大，露出水面的海山即为火山岛，火山岛和海山排列成行时即为火山岛链。海山的顶端一般呈锯齿状，但也有呈平坦状的，称平顶海山，即盖奥特（Guyot），顶面水深数百米至 2000m 不等，是火山岛被海蚀作用削平后沉没形成的（图 028-4）。Guyot 主要见于太平洋，约有 220 座。三大洋中还散布有宽缓的海底高地——海隆（如百慕大海隆）及顶面平坦、四周边坡较陡的海台（海底高原）。海



台一般由熔岩堆积形成，也有具花岗岩基底的海台，这类海台也称微型陆块，如印度洋中塞舌耳群岛所属的马斯卡林海台。海台在印度洋中最为发育。

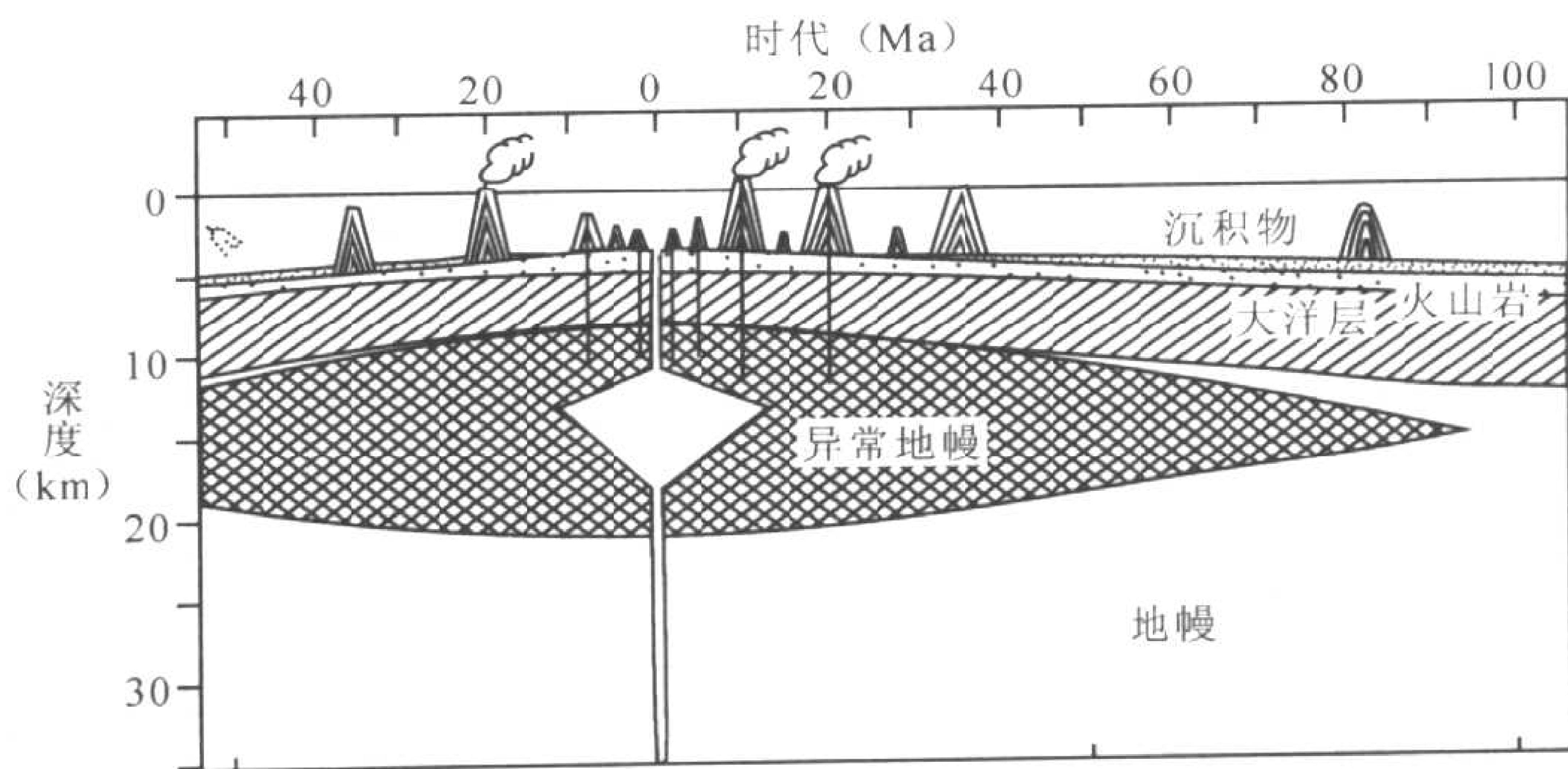


图 028－4　海底平顶海山（盖奥特）的形成

大洋盆地是海底三大巨型地形单元（大洋边缘、大洋盆地、大洋中脊）中最大的地形单元，面积约 16300km^2，约占海洋总面积的 45%，占地球总面积的 32%。

029 大洋中脊与全球裂谷系

大洋中脊或中央海岭既是洋底巨大的地形单元，也是最重要的海底构造单元。它的发现是地学史上的一大奇迹，而大洋中脊中央大裂谷的发现则是奇迹中的奇迹。

大洋中脊首先发现于大西洋，是 19 世纪 70 年代由英国“挑战者”号利用测深锤测量深度时所发现的，但被详细测绘则是 20 世纪 20 年代由德国“流星号”通过电子回声测深法所完成的（图 029－1）。到了 20 世纪 30 年代又相继在印度洋和太平洋中发现了洋中脊，到了 50 年代又得知：这些洋中脊是相互连接和绵

延不断的，总长度约 65000km[①]，是地球上最长、最大、最宽的环形山系，约占海洋总面积的 33%，可与全球大陆面积相比。大洋中脊轴部高于两侧洋底，其相对高度为 2000～3000km，中脊宽度为 1000～2000km，但变化较大，最宽达 3000～4000km，最窄仅数百千米。各大洋中脊顶部的平均水深在 2500～2700m 之间，局部可露出水面成为岛屿，如冰岛。中脊地形崎岖不平，常有次一级岭脊与谷地相间排布，并大致平行于中脊走向。中脊翼部多由海山群和深海丘陵组成，自脊顶向两侧，随着沉积逐渐增厚（中脊顶部沉积层极薄或缺失），地形起伏也逐渐平缓，延至洋盆底部，可出现深海平原地形。全球三大洋中以大西洋中脊最为典型，且极为壮观，其次为印度洋中脊，太平洋中脊起伏程度小于大西洋中脊。

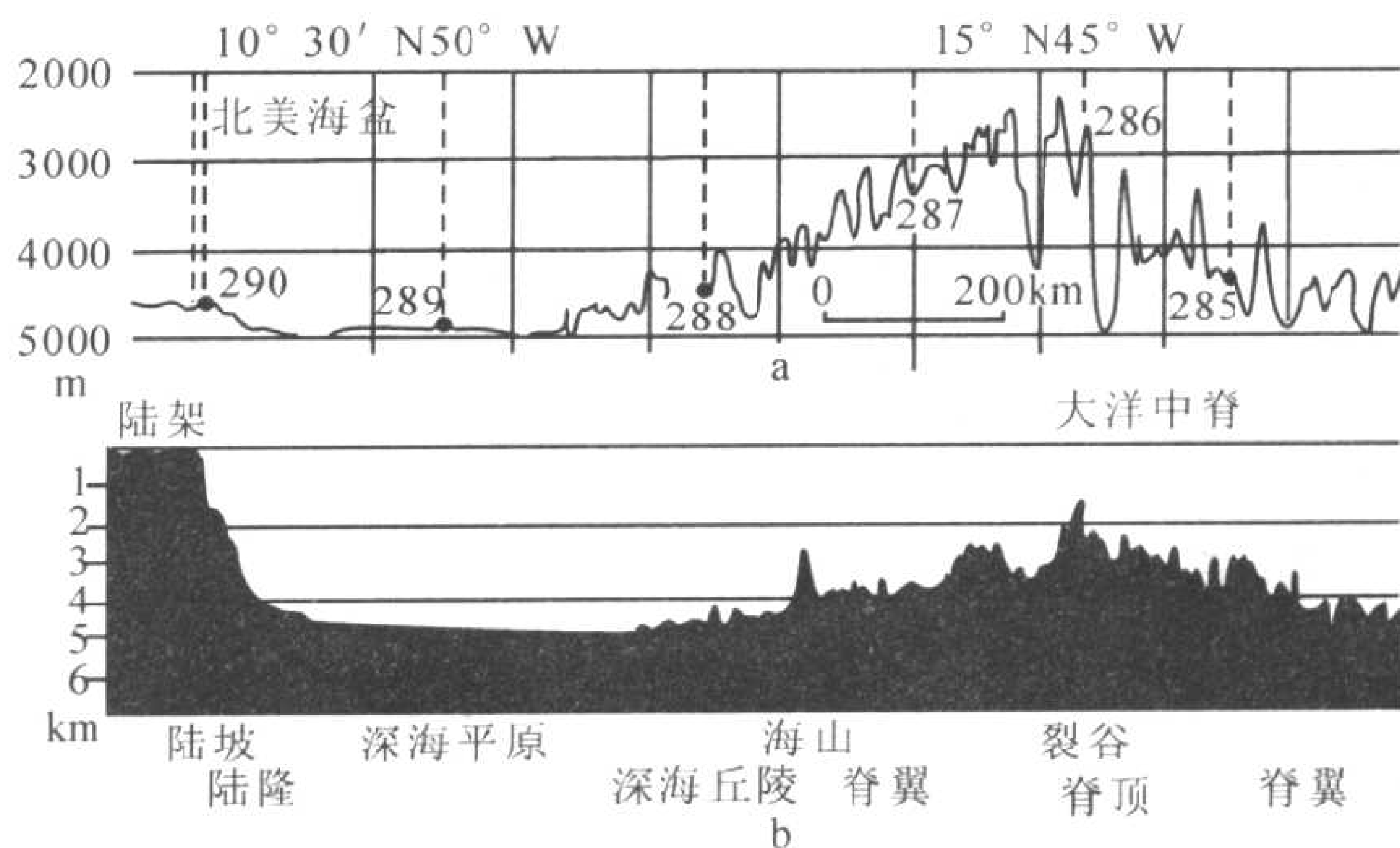


图 029－1　大西洋中脊及邻近海底地形剖面图

a. 德国“流星号”测绘的地形剖面

b. 现代测出的地形剖面

大西洋中脊：大西洋的大洋中脊呈“S”形纵贯中部，并分割大西洋洋底。大西洋中脊向北穿过冰岛进入北冰洋继续延伸，

① 另一说法是总长 80000km。



向南至南极附近的布韦岛，依两岸“S”形地形蜿蜒而下，至40°S后折向SE（55°S），与印度洋的SW支大洋中脊衔接，并向北延伸最后进入北海。大西洋中脊平均宽度约为1000m，长度超过1万km。露出海面的最高火山峰是亚速尔群岛的皮科峰，海拔2321m。

印度洋中脊：印度洋中脊亦大体居中，呈“入”字形或倒“Y”形分布。北起印度半岛，北端向西延伸后进入亚丁湾和红海，并与东非大陆裂谷相接，南端南下至20°S分为两个分支，SW分支（西南印度洋中脊）与大西洋中脊相连，SE分支（东南印度洋中脊）在澳大利亚西部与太平洋中脊衔接。印度洋中脊北半部正东是查戈斯—拉克代夫海台，最北端为印度西海岸的阿拉伯海。由此向东是一条笔直的洋中脊（中印度洋海岭），其长度达5000km。据调查，印度洋中脊正以10cm/a的速度从中心分开。

太平洋中脊：由于太平洋中脊主体偏向东，且西坡比较平缓，相对高度较小，故称东太平洋海隆。东太平洋海隆向北伸进加利福尼亚湾，然后沿北美洲西海岸南下（折向正南），大致与南美洲西海岸平行延伸至20°S处，再转向西横穿南太平洋，绕过澳大利亚南部，与印度洋大洋中脊相衔接，东太平洋海隆高出洋底2000~3000m，长达15 000km。在海隆上每隔322km即出现一个断层（断层带），而且断层带较长，如克拉里恩断层带，从墨西哥海岸一直延伸到夏威夷群岛。

此外北冰洋中还有三个洋中脊（海岭），分别是阿尔法海岭、罗蒙诺索夫海岭和北冰洋中央海岭，其中阿尔法与罗蒙诺索夫海岭大致呈平行展布，全长18 000km，但是否是中脊尚有异议。海岭顶部在海面之下的高度为180~1200m。

洋中脊大裂谷：如前所述，洋中脊在地形上是由一系列大致平行的线状峰脊和线状谷地所组成的，而洋中脊顶部中央则是一

条线状地堑，称轴部裂谷，亦称中央裂谷、洋中脊大裂谷。谷宽25～50m，谷深1000～3000m。此与中脊扩张速度有关。慢速扩张的洋中脊，如大西洋中脊地形起伏大，轴部裂谷高差可达1500～3000m，岩浆房深度大而规模小，火山喷发周期为1000～10000a，火山岩与中脊在空间上彼此远离。快速扩张的洋中脊，如太平洋中脊，地形起伏较为平缓，岩浆房埋藏较浅，火山喷发周期为50～500a，火山与中脊线性较好，此外转换断层的间距也较大。根据拖网采样及深潜观察，裂谷内主要岩石组成为枕状玄武岩及玄武岩，其上几乎没有沉积物，但伴生有大量与裂谷长轴一致的正断层。断层面多向中脊轴部倾斜，横断面呈“V”字或“U”字形（图029－2），显示地壳正在遭受伸展作用，而中央裂谷则构成地球上最大的张裂带。由于各大洋中脊都具有张裂性质的中央裂谷，所以学者们把地球上这一系列大裂谷称作全球裂谷系。

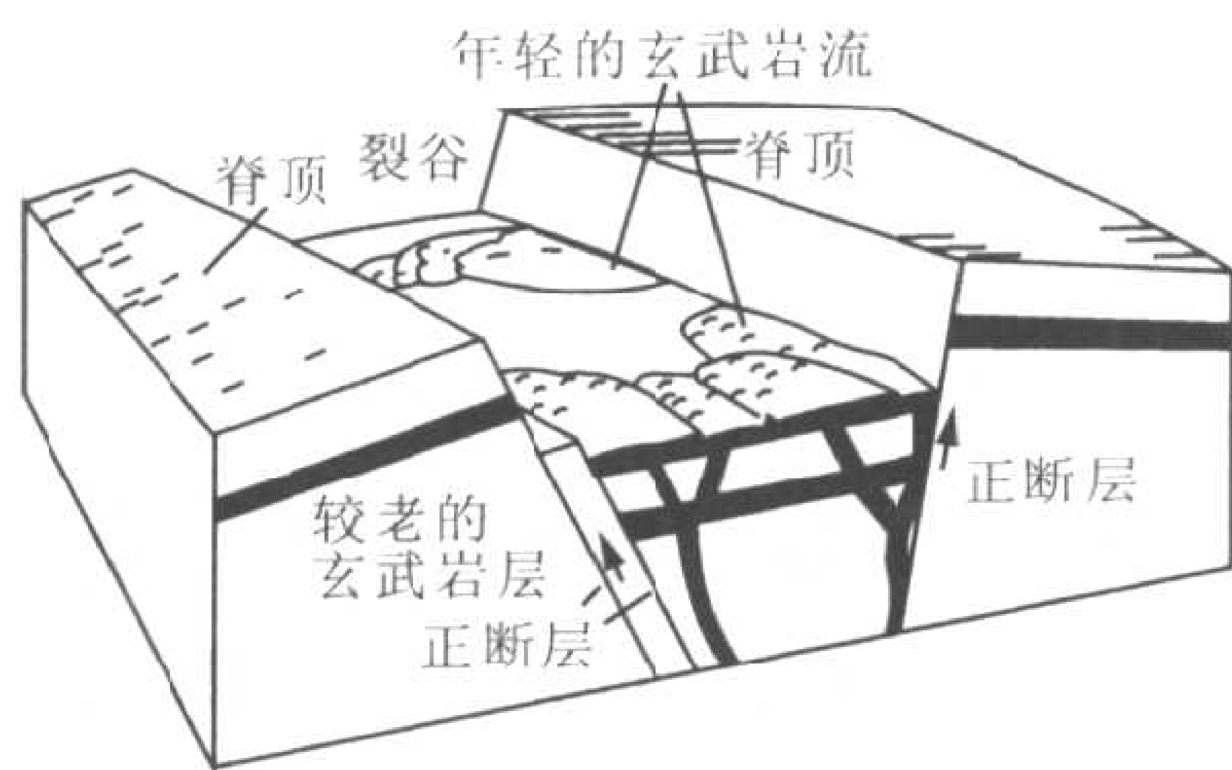


图029－2　洋中脊大裂谷示意图

全球裂谷系的洋壳结构与洋盆标准大洋地壳相比，其地壳较薄，仅2～6km，壳下有异常地幔存在，中脊轴部莫霍面抬升，火山及浅源地震频繁，热流值大于周围洋盆，高热流值见于脊顶及中央裂谷带，平均值可达2～3HFU以上。在东太平洋海隆（21°N）和加拉帕戈斯海岭顶部，由深潜器直接观测到的海底热泉的温度可达380℃，说明中央裂谷是上地幔物质上涌出口处，其下可能有炽热的岩浆房。此外，中央裂谷区的布格异常低值（130～200mGal）清晰地显示出正负相间排列的磁异常条带。

海底扩张说认为，中脊轴部即中央裂谷是海底扩张的中心，

其隆起地形实际上是脊下物质热膨胀的结果。在扩张和冷却的过程中形成了轴部高、两翼低的巨大海底山系。

130 魏格纳猜想的魅力：大陆漂移说

诞生于20世纪初的魏格纳猜想：大陆漂移说，被誉为是20世纪科学改变人类生活的100个瞬间之一，是开启20世纪最伟大的神话之一，也是科学界公认的诺贝尔奖的最大遗憾之一。

大陆漂移说的提出，最初是从对“地球僵硬，大陆固定，海洋永存”这一根深蒂固的固定论理念的科学怀疑开始的。挑战者是当时年仅32岁的青年气象学家、探险家阿尔弗雷德·洛萨尔·魏格纳（Alfred Lether Wegener）。魏格纳的挑战使他率先成为推动20世纪地球科学向前发展的旗手和奠基人。国际著名学者、加拿大地球物理学家威尔逊（T.J.Wilson）评论说：“我们这个时代发生的这场伟大革命，应当称作魏格纳革命。”

A.L.魏格纳于1880年11月7日诞生于德国柏林一个孤儿院院长的家里，1905年毕业于柏林因斯布鲁克大学，毕业后从事气象和教学工作，1924年任奥地利格拉茨大学气象学和地球物理学教授。魏格纳一生酷爱探险和飞行，他发明了探空气球，并在1906年和他哥哥库尔特驾驶热气球连续飞行52h，飞行高度达3700km，创造了世界纪录。为了探索极地的奥秘，他曾4次参加和组织赴格陵兰的探险活动。1930年11月2日，魏格纳在格陵兰岛的第4次探险途中，在-65℃的严寒里遭遇风雪袭击而不幸遇难，时年50岁。魏格纳的同伴在悼念魏格纳的悼词中写道：“他经常经过深思熟虑以后说‘结果肯定会这样’，而在多数场合他的预言都是正确的。”大学时代的同窗好友回忆说：魏格纳当年的学习成绩平平，天赋一般，但是他具有任何一个后来成为科学上的伟大人物的那种自信心和进取心，追求目标的执著毅力和敢为天下先的冒险和创新精神。

魏格纳不是一个地质学家，他关注地质学主要是为了解释古气候问题。为什么热带的蕨类植物过去会在伦敦、巴黎甚至在格陵兰生长，而巴西、刚果在过去为什么会被冰川所覆盖？他思想的一闪念，简单而合理的逻辑是这些地方曾经在地球上挪动过位置，也就是说大陆彼此之间以及大陆相对于大洋之间发生过水平位移。

1912年1月6日，魏格纳应法兰克福地质学会之邀做了题为“根据地球物理学论地壳轮廓（大陆和海洋）的形成”的演讲，第一次正式阐明了他的大陆漂移的设想，1月10日他又在马尔堡科学协进会上做了题为“大陆的水平位移”的演讲，同年，他的演讲稿分别发表于《彼得曼文摘》和《地质杂志》上。这一切都表明：大陆漂移说诞生了。1915年魏格纳的专著《海陆的起源》一书出版，并于1920年、1922年、1924年3次再版。1922年的版本先后被译成英、法、西班牙、瑞典、俄、日、汉等各种文字，在世界传播，成了新地球观的经典文献。

魏格纳设想：大陆是由较轻的刚性硅铝质组成，漂浮在较重的粘性硅镁质层上，可以做水平移动，大陆块有向西漂移和离极漂移两种趋向。在距今约2亿a的侏罗纪，地球上只有一个超级古大陆即联合古陆，也称泛大陆，环绕联合古陆的是一个统一的古大洋即泛大洋，此即地球科学的“1+1”问题，也称魏格纳猜想。魏格纳认为：从侏罗纪开始，由于地球自转变化和太阳、月球的潮汐作用，联合古陆分裂开来并开始漂移，北美洲离开了欧洲，南美洲向西漂移，于是形成了大西洋，而非洲向西漂移时有一半脱离了亚洲，它的南端与印度次大陆分离，中间出现了印度洋。南极洲和澳洲也同亚洲分离，逐渐漂移到现今的位置（图030-1），也就是说，现今的4洋（太平洋是泛大洋的残余）、6陆都是经过大陆漂移后形成的。

魏格纳提出大陆漂移的证据主要有4个方面。

1. 大陆岸线的相似性：南大西洋两岸、南美洲东海岸与非洲海岸的岸线轮廓相互对应，明显吻合，可以拼接成一个整体、一个大陆。20世纪50年代，澳大利亚学者凯里以大陆坡中点，即海洋平面以下2000m等深线为界，进行了计算机拟合，表明南美洲与非洲的外形可以拼合；60年代，英国地球物理学家布拉德（E.C.Bullard）等选用大洋两岸大陆坡中点500 fathom[①]等深线作为拼合线，同样进行了计算机拟合，把大西洋西缘很好地拼接到了一起（图030－2）；80年代，迪茨（K.S.Dietz）和霍尔登（J.C.Holden）又对联合古陆进行了复原，其中大陆被相当精确地拼合了起来。此外也还有一些学者对南极洲、澳洲和印度也进行了计算机拟合，拟合误差平均仅51.9km。

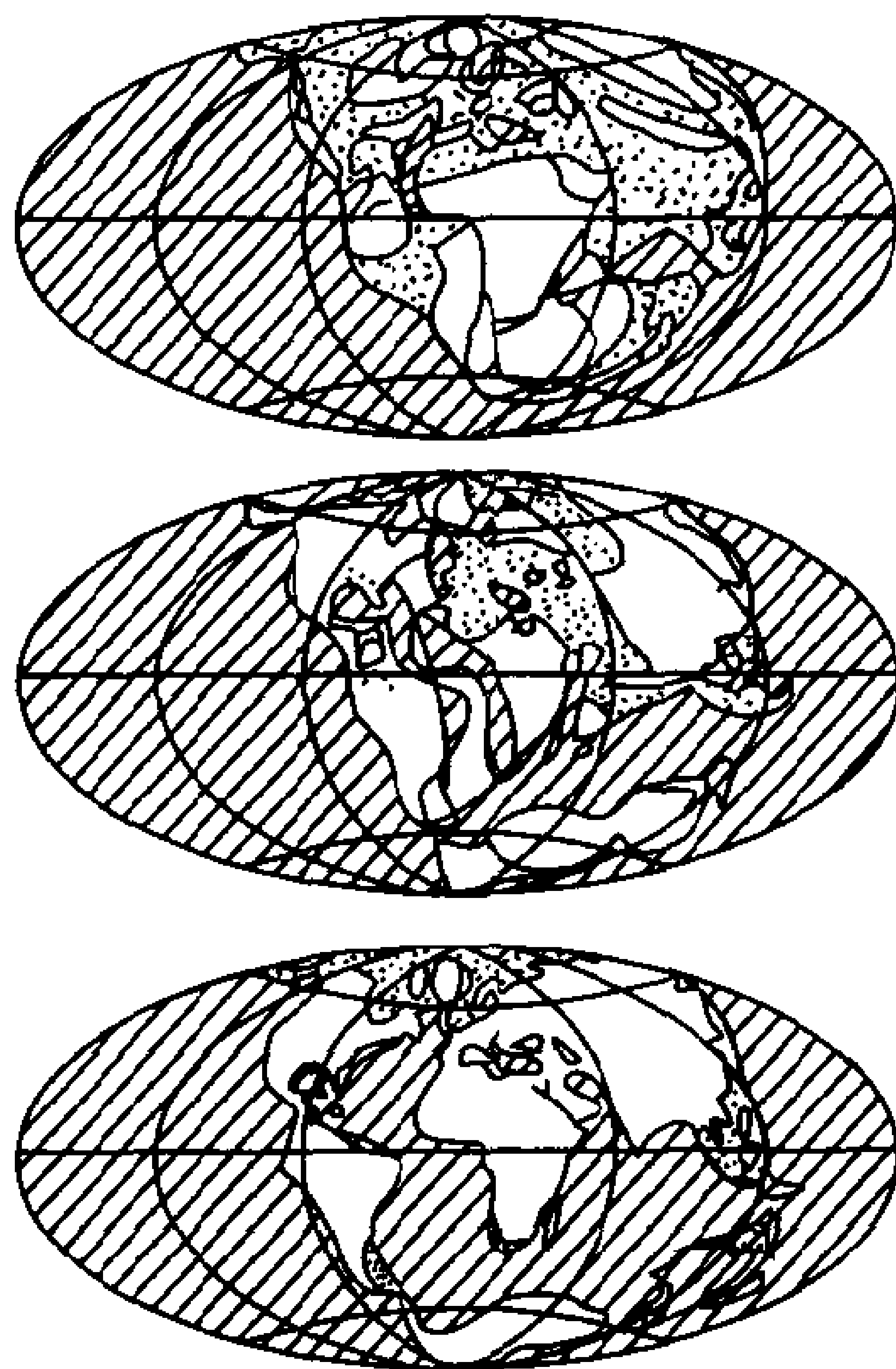


图030－1 魏格纳绘制的大陆漂移图（假设非洲固定）
上图：石炭纪晚期；中图：始新世；下图：第四纪晚期
图中白色为陆地，细点为浅水淹没的陆地，斜线为洋底

2. 褶皱山系及岩石区的延续与拼接：非洲南端兹瓦特山与南美布宜诺斯艾利斯之南的山脉同属东西走向的二叠纪褶皱山系，可以连接；非洲西部的古老岩石区，可与南美洲巴西的古老

① 1fathom＝1.8m。



岩区相互连接，后来（1975）证明，二者都形成于20亿a前，岩石结构构造特征一致。此外欧洲的挪威、苏格兰、爱尔兰与北美纽芬兰的加里东褶皱山系遥相呼应，美国阿巴拉契亚山的海西褶皱带，其北东端没入大西洋，延至英国西南部和中欧一带复又出现，也可连接。



图 030－2　大西洋周围大陆拼合图
（用500 fathom等深线拼合）

3. 古冰川的分布：南美洲、非洲、澳大利亚、印度和南极洲（统称冈瓦纳古陆）在晚古生代广泛发育有冰川。从冰川遗迹的分布判断，当时冰川中心应在南极附近，属大陆冰川。而南美洲、印度和澳大利亚的冰川遗迹又主要残留于这些陆块的边缘，冰川运动方向是从海岸指向内陆，说明古冰川不是发源于本地。如果晚古生代上述大陆是连接在一起的，则冰川中心为非洲以南的古陆。冰川由中心向四周呈放射状流动（图 030－3），就能很好地解释冰川的流动方向及空间分布。此外古气候的分带性与现代气候带位置不协调，如现今位于北极圈内的斯匹次卑尔根群岛发现白垩纪—第三纪的热带植物群和第三纪温带植物群，而现在地处热带—亚热带的南美洲、非洲、澳洲和印度存在着石炭—二叠纪大陆冰盖，我国西藏和滇西则分布着同时代的山岳冰川等。冈瓦纳古陆晚古生代大陆冰川的分布是魏格纳大陆漂移说最具有说服力的古气候证据。

4. 古生物群的亲缘性：在巴西的晚古生代地层中，普遍含有一种生活在淡水或微咸水中的中龙化石，而迄今为止，地球上

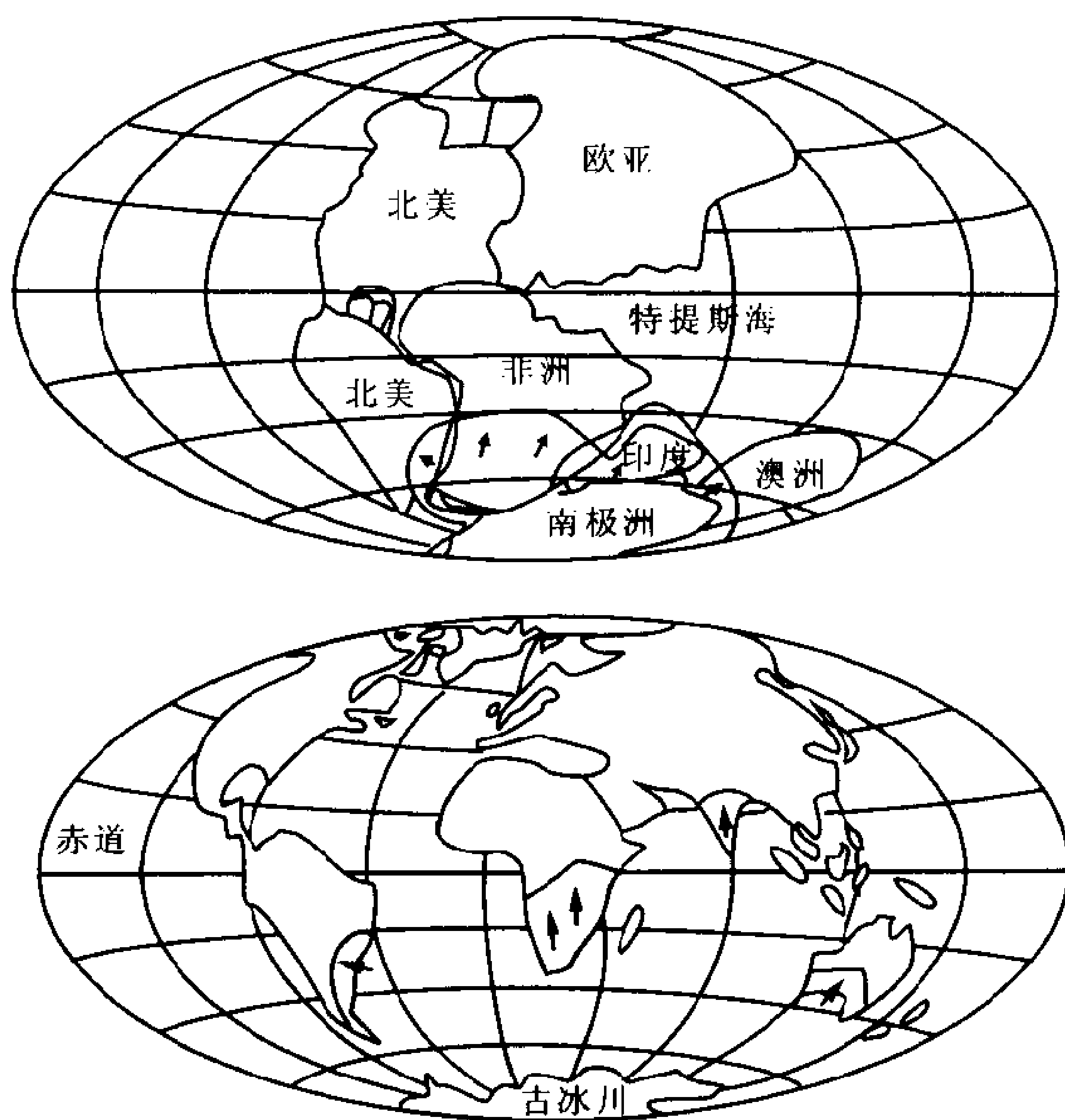


图 030－3　古冰川与大陆漂移
上图：晚古生代冰川（灰色）在复原的冈瓦纳大陆上的分布；下图：晚古生代冰川在现代大陆上的分布
（箭头示古冰川流动方向）

其他地区都未曾发现；又如非洲、南美、印度、澳大利亚、南极等大陆的石炭—二叠纪地层中均分布有羊舌齿，表明上述诸大陆过去是一个整体。因为同一物种必定起源于同一地区，然后传播与扩散。

魏格纳大陆漂移说作为一个科学命题提出后在地学界掀起了轩然大波和激烈争论。支持者认为它的重要性如同哥白尼的"日心说"、达尔文的"进化论"一样，将引起地学的革命性变革；反对者则斥之为"天方夜谭"。因为魏格纳的这种远距离水平移动的新活动论不同于当时流行的传统固定论观点，并远远超出了

常人的想像力，超凡脱俗，独树一帜，所以遭到传统力量的嘲讽和反对是必然的，特别是自魏格纳遇难后，在大陆固定论的重压下，大陆漂移说沉寂了下来。直到20世纪50年代后期，当大陆漂移理论再次浮出水面时，魏格纳的主要反对者，英国地球物理学家杰弗里斯仍在全盘否定大陆漂移说，他在专著《地球：它的起源、历史和物理组成》一书第4版（1959）中，指责魏格纳的大陆漂移说是："定量不够、定性不当，我们所需要了解的，它什么也没有说明。"在科学史上，依靠习惯势力，采取否定态度，反对新观点、新理论是容易的，而客观地评述和支持不同于流行的传统观点则比较困难，这正如青年学者瓦因（F.J.Vine）在1977年回顾这段历史时所说："长久以来，北半球有自尊心的地质学家们似乎都不愿用自己的声誉冒险，去发表有关大陆漂移的长篇大论，以致使地质学停滞不前达40年之久。"然而历史已经证明：由魏格纳开创的大陆漂移说，无疑是地球科学的"哥白尼式的革命"。而大陆漂移—海底扩张—板块构造则是这场革命的壮丽三部曲。大陆漂移说50年的风雨历程一波三折，"崛起—沉寂—复活"，实际上也正是科学史上一切重大创新过程的命运交响曲。

031 古地磁与大陆漂移

古地磁学家们的大量研究证实，以近2000a以来岩石标本的地磁场变化所求出的地磁极，不是以现代地磁极为中心分布的，而是聚集在地理极周围。这些磁极的平均位置与现代地磁北极相差约14°，而与地理极相差约4°。扩大研究至2000万a，研究1000多块火山熔岩（热剩磁）磁极位置的投影图（图031-1）发现，它们是以地理极为中心的极点，这说明在过去2000万a内，地球磁场是一个偶极子场，其方向大致与地球自转轴一致。根据这一假定，不同地质时期的古磁纬度可以近似地看做古地理



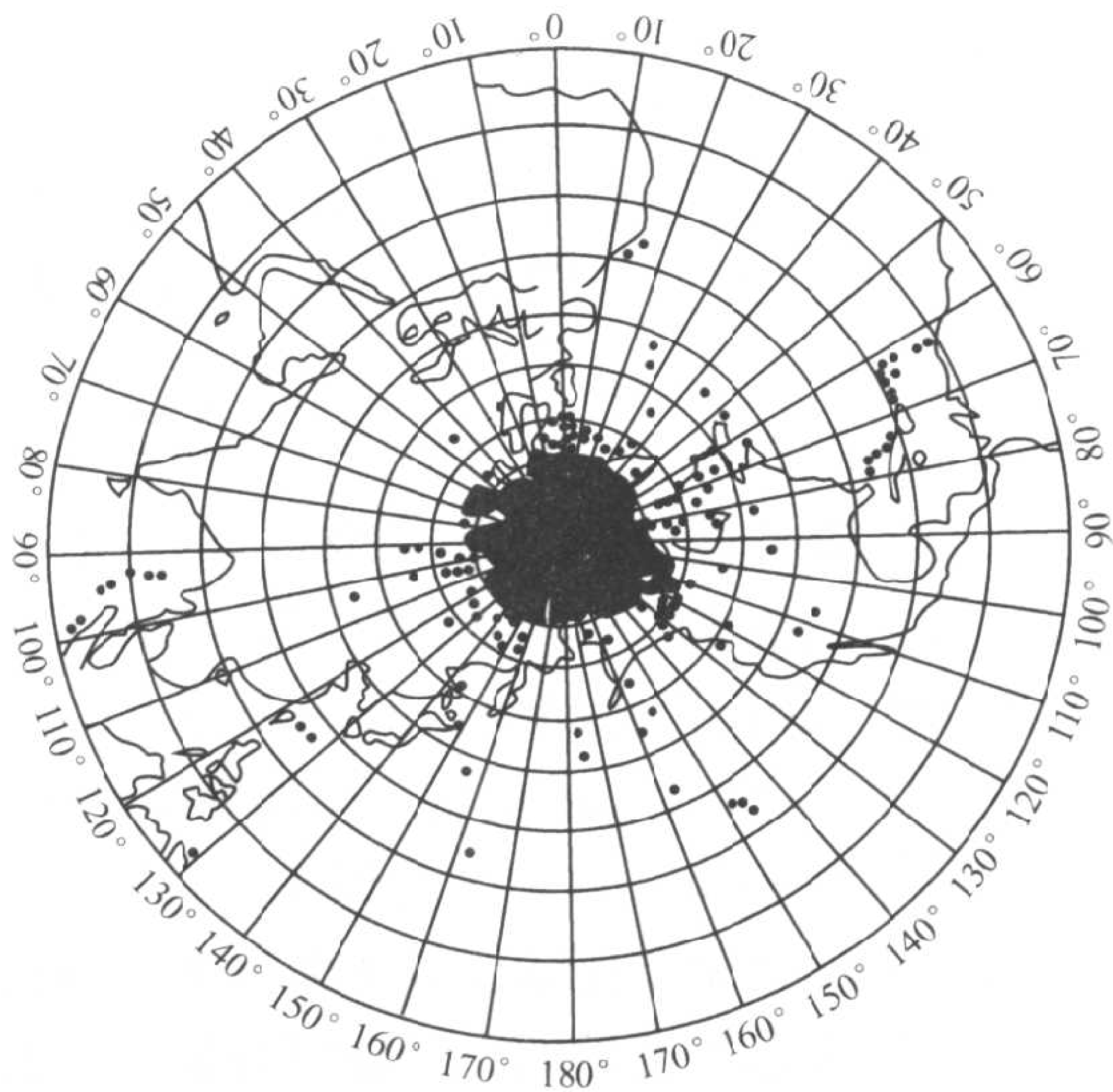


图 031－1　2000 万 a(年)以来熔岩磁极位置投影图

纬度，其平均位置是地理轴。如果把古磁纬度与现今地理纬度加以比较，即可发现现代地理极明显偏离，表明大陆曾经发生过漂移。以印度德干高原 180Ma 以来不同熔岩的古地磁纬度为例（图 031－2),不同地质时期的古纬度与现今的纬度（18°N）都不同，

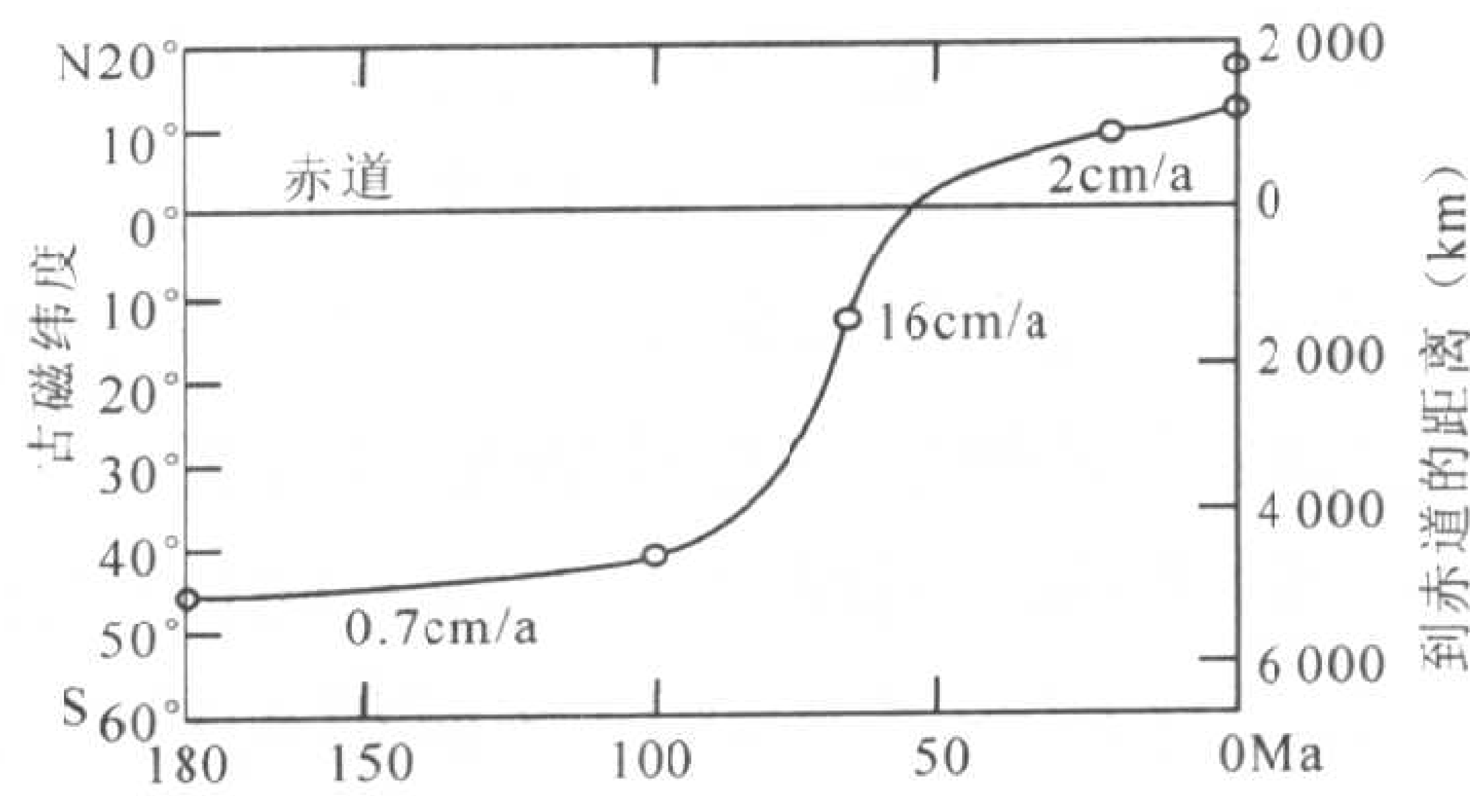


图 031－2　印度德干高原火山熔岩
古磁纬度随时间变化曲线



随地质时代的变新，印度德干高原从180Ma前的南纬46°逐渐向北漂移，在50Ma前后到达赤道附近，随后继续向北漂移而到达现今18°N的位置，其漂移速率最初为0.7cm/a，之后增加到16cm/a，到距今约50Ma时又减慢到2cm/a，最后与亚洲大陆相碰撞。

我国西藏的雅鲁藏布江被认为是欧亚板块和印度板块交接边界的缝合带。在对其交界两侧中生代岩石标本的古地磁数据研究后发现，南北两侧岩石标本的古地磁纬度相差甚大。雅鲁藏布江以南为南纬21°/24°，以北为北纬1°，与现今纬度（北纬28.6°/28.9°）比较，分别相差50°和28°左右，说明雅鲁藏布江以南的印度板块和以北的欧亚板块，自中生代以来，都曾向北漂移过，但印度板块向北漂移的速率要比欧亚板块大得多。另据来自雅鲁藏布江以南定日和以北东巧两地的古地磁资料表明，始新世定日的古纬度为4.6°N，现今的纬度为28.8°N，表明向北漂移24.2°，约2700km；而始新世东巧的古纬度为29.5°N，二者的纬度差为24.9°，约2800km。目前东巧与定日间直线距离约为400km，这就是说，自始新世以来，雅鲁藏布江南、北之间的地壳缩短约2400km。又如，始新世时拉萨的古纬度为13.8°N，与定日之间的纬度差为9.2°，约1000km，而目前定日与拉萨之间仅120km，这表明，自始新世以来，两地之间地壳缩短约900km。

如果地球上各大陆固定不变，彼此没有相对运动，则古地磁极位置亦应是固定不变的，这样各大陆不同地质时期所有标本剩余磁性的平均地磁极位置都应和现代地理极位置基本一致，然而大量古地磁测定资料表明，当把某一大陆不同地质时期的磁极位置标出，并按时间顺序用线条连接起来而得到极移曲线（APW）即地磁极移（虚磁极）后就会发现，古地磁极与地球自转轴发生了偏离。假若固定地理极，以南美大陆为例，则南美大陆必定如图031-3（a）所示那样发生漂移；假若固定南美大陆，则极移

曲线必定如图 031 - 3（b）所示那样发生游移。

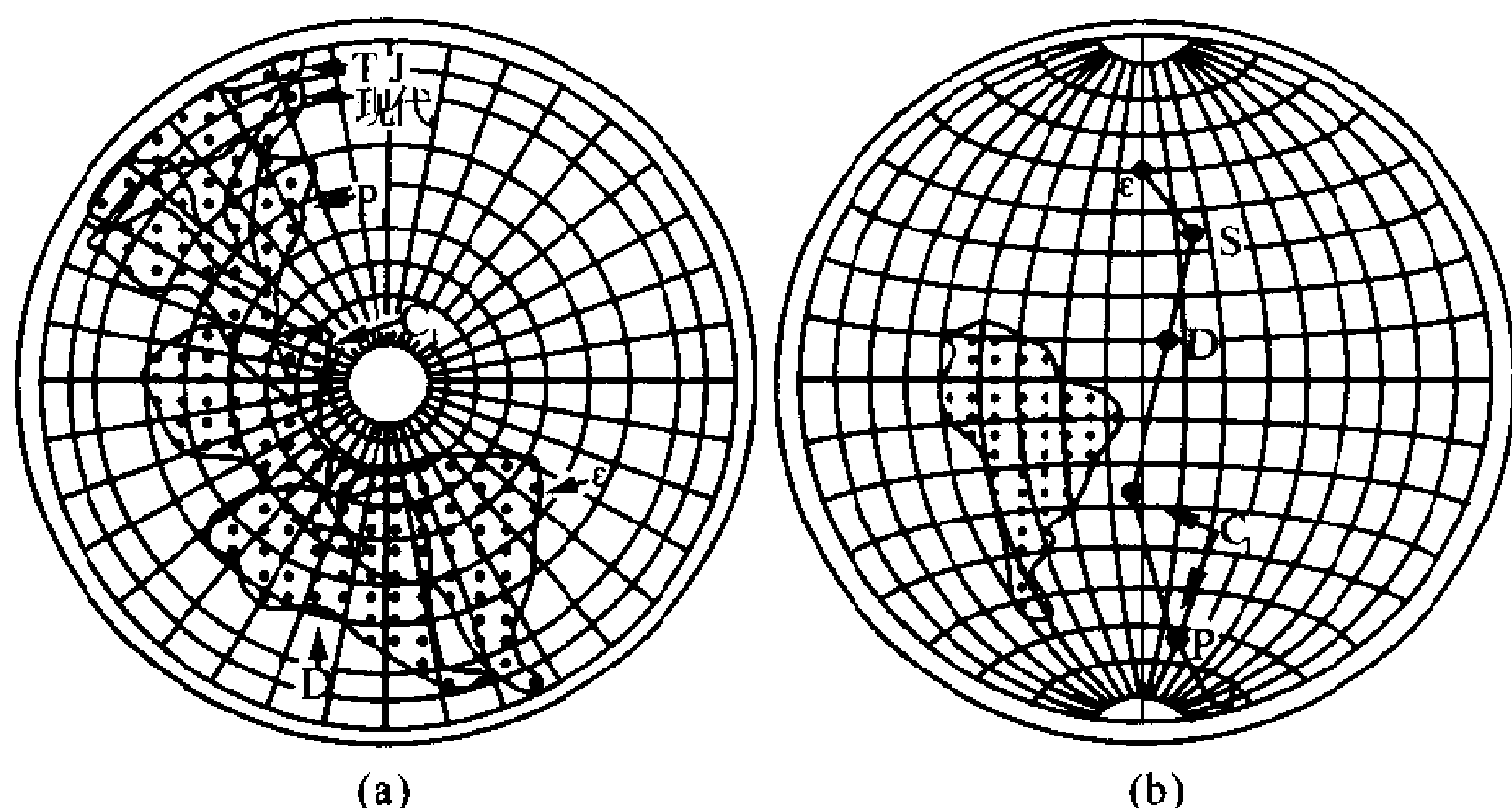


图 031 - 3 南美洲显生宙磁极位置

（图中英文字母为地质时代符号）

最早研究并发现极移曲线变化的是 20 世纪 50 年代英国伦敦皇家学院以朗科恩和布莱克特为首的研究小组，他们发现欧洲和北美大陆岩石标本所测出的两条磁极移曲线，虽现代相交于一点，但在 400 ~ 100Ma 前时则是相互分离的，时代愈老，磁极偏离现代位置愈远（图 031 - 4），在 5 ~ 6 亿 a 的时间内可达 90°。如果把北美大陆的极移曲线叠加到欧洲大陆极移曲线之上，则需将北美大陆向东退移 20° ~ 30°（经度），这时大西洋消失，也就是说，从前没有大西洋，北美大陆和欧洲大陆是拼合在一起的，这正好形成了魏格纳所提出的联合古陆格局。

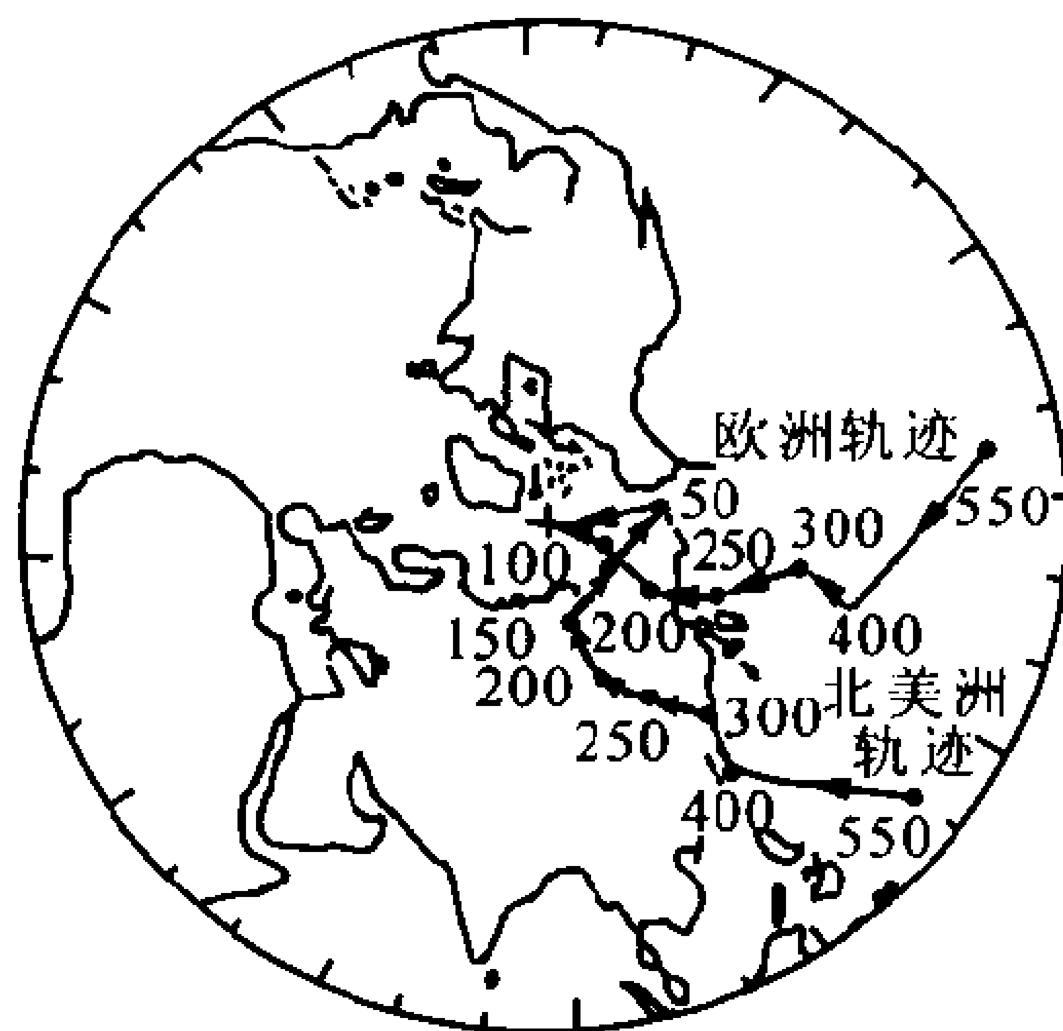


图 031 - 4 北美洲和欧洲磁极移

（图中数字代表距今年代 Ma）

魏格纳的漂移说还认为非洲、南美洲、印度、澳大利亚和南极

洲在漂移前的古生代是连在一起的（南方大陆）。如果把这些陆块拼合在一起，标出这些大陆相应岩石所测得的古生代极移轨迹，它们应当大致重合。图 031－5 给出了它们在古生代的地磁极移路径，表明它们是属于同一大陆的陆块。另外还有学者根据澳大利亚石炭纪以来的岩石剩磁所勾绘的相对于南极的地磁极移轨迹变化（图 031－6），则更形象地显示出澳大利亚在石炭纪至现代逐渐远离南极而向北漂移的经历。

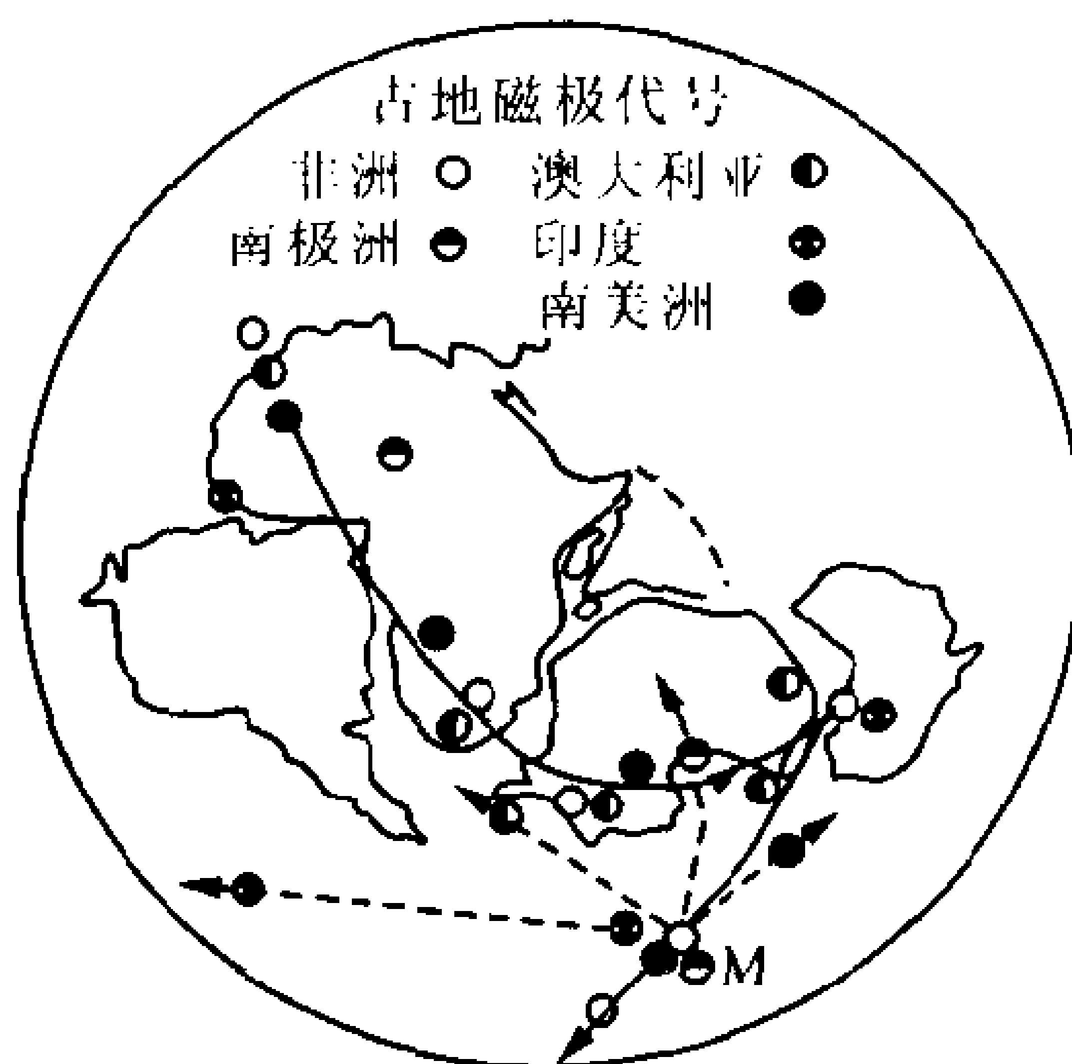


图 031－5　南方大陆古生代磁极移轨迹

非洲、南美洲、澳大利亚、印度和南极洲各大陆的磁极移轨迹大致重合（实线）；中生代（M）以后各大陆磁极移轨迹变得分散（虚线）

非洲和南美洲的晚古生代极移曲线，不仅在形状上较为相似，而且两者之间的宽度也与大西洋的宽度相当。当把两条曲线重叠时，南美洲与非洲大陆则正好拼接在一起。这说明为了满足同一地质时代有一个磁北极（地理北极）的要求，则当时大西洋必定不存在，在这一点上与北美和欧洲大陆的研究结论是一致的。

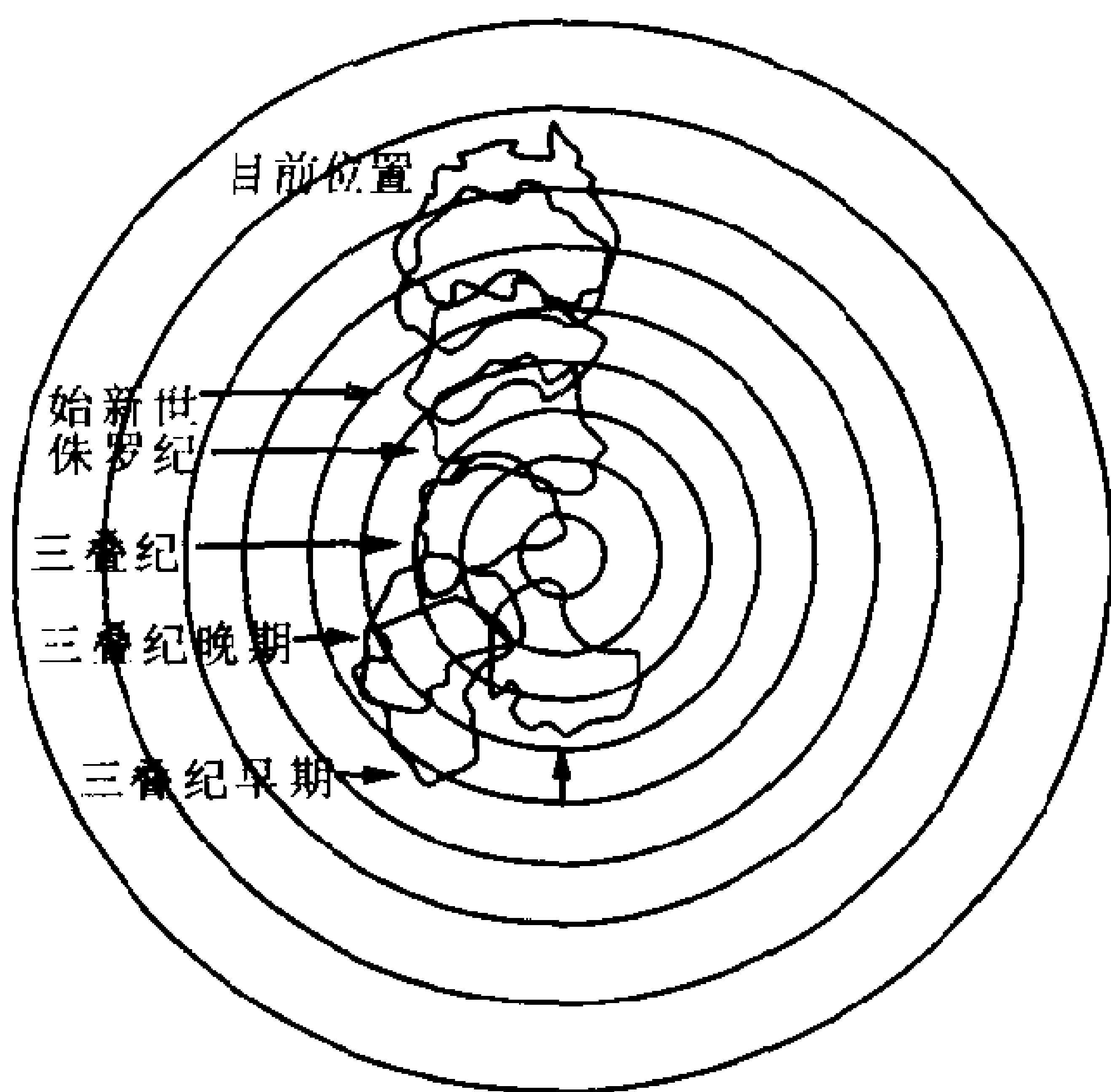


图 031－6 澳大利亚相对于南极的漂移轨迹（石炭纪至现代）

032 显生宙的海陆演变

显生宙指从寒武纪开始出现大量较高级动物以后的阶段，包括古生代、中生代、新生代。地质年龄一般认为是 570Ma 前至今。

魏格纳的大陆漂移图像，由于历史及资料局限，主要为中生代侏罗纪以来的大陆漂移，实际上在距今 700 ~ 800Ma 的新元古代末期，全球就存在有泛古陆和泛古洋了（王鸿祯，1997），而最近中美科学家的联合研究则更进一步表明，早在 2500Ma 之前，在我国华北就出现有古大陆和古大洋了。反映古大洋闭合、古大陆碰撞缝合线的最完整的洋壳残片——蛇绿岩杂岩已在我国冀东（遵化）及辽西被发现，长达 200km。根据李江海博士等的研究，那时的板块运动模式与近代非常相似。

显生宙之前的古大洋与古大陆配置如图 032 - 1a 所示，图中的泛非—贝加尔构造线就是显生宙之前泛古陆、泛古洋的板块缝合线。在距今 570Ma 的寒武—奥陶纪，地球表面存在着几个分隔的陆块，至少有 4 陆、4 海。4 海是海西宁、加里东、乌拉尔和特提斯，4 陆是北美洲、欧洲、古亚洲（古中国）和冈瓦纳古陆（图 032 - 1b）。当时的冈瓦纳古陆可能还包括佛罗里达、南欧、土耳其、伊朗、阿富汗和中国西藏地区等。古北美洲可能还包括格陵兰、西伯利亚东端等。古欧洲东部以乌拉尔缝合线为界，南缘是海西缝合线。古中国大陆主要指塔里木—中朝板块。寒武—奥陶纪海陆分布的一个显著特征是古北美、古欧洲、古亚洲（西伯利亚）及古中国大陆大都位于较低纬度。在距今约 370Ma 的志留—泥盆纪，古欧洲与古北美大陆间的洋盆关闭，板块碰撞，古加里东海消亡，形成加里东造山（褶皱）带（图 032 - 1c），此期两大陆相遇碰撞是显生宙的第一次大陆碰撞，这次碰撞形成了有老红砂岩广泛沉积的欧美大陆。欧美大陆红色砂岩的广布，表明

它所处纬度较低。泥盆纪以后几个大陆继续靠拢，冈瓦纳大陆做顺时针转动，非洲、南美洲一侧向北推移，大约在距今290～300Ma的晚石炭世，古海西宁海消亡，欧美大陆沿海西宁褶皱带与冈瓦纳连接起来（图032－1d），形成了更大的超级大陆。石炭纪时冈瓦纳大陆发生了广泛的冰川作用，说明其主体应位于南半球中高纬度地区。至二叠纪随着乌拉尔海在俯冲作用中化为乌有，古西伯利亚大陆与欧洲大陆东缘碰撞，形成乌拉尔褶皱带。此时古中国地块与古西伯利亚大陆已联合（其间为中亚—蒙

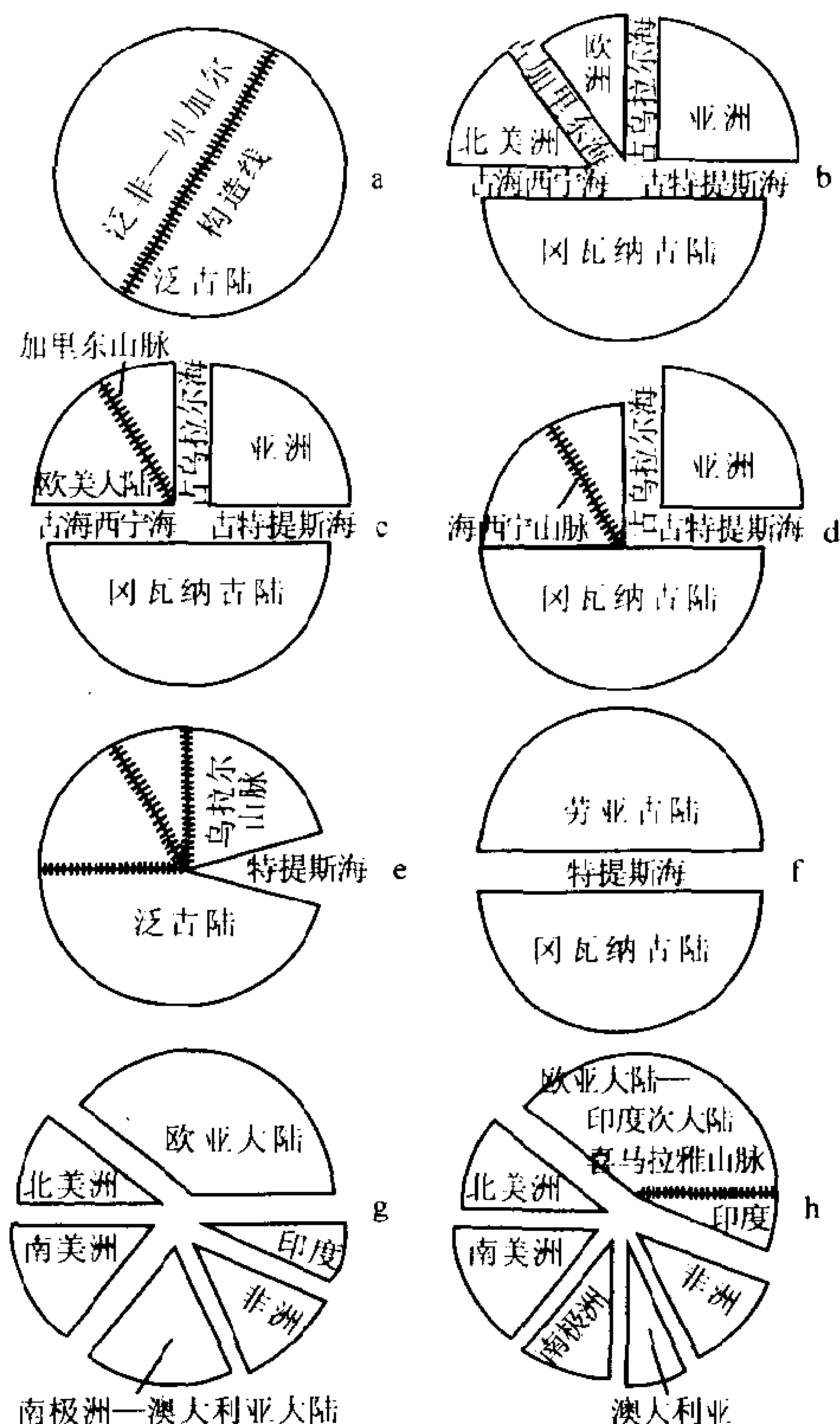


图032－1　700Ma以来地球海陆演变示意图

古褶皱带），重新组成了欧（洲）亚（洲）美（洲）非（洲）泛古陆，即联合古陆，但特提斯海仍然存在，它呈三角形楔入联合古陆之中（图032－1e）。这时作为太平洋前身的泛古洋也仍继续存在。在距今约190Ma的早侏罗世，从墨西哥湾到直布罗陀一线张裂，承袭泛古洋的太平洋分出一支切入墨西哥湾，称太平洋海，它与由东向西而发育伸展过来的特提斯海连在一起，把联合

古陆一分为二，北部称劳亚古陆，南部称冈瓦纳古陆，这时太平洋已正式形成（图 032－1f）。现在太平洋西北部洋底发现的年龄近 200Ma 的洋壳即为证明。在距今 135～110Ma 的早白垩世，南大西洋开始张裂，形成洋盆，而后欧洲与北美分离。在距今约 70Ma 的晚白垩世，劳亚古陆和冈瓦纳古陆高度分裂，大西洋、印度洋和南大洋相继出现。两大古陆裂解后形成了欧亚大陆、北美大陆、南美大陆、非洲大陆、印度次大陆和南极洲—澳大利亚大陆（图 032－1g）。从距今 65Ma 的古新世开始，格陵兰与斯堪的纳维亚分裂，挪威海与格陵兰海形成，北冰洋与大西洋连通。在距今约 53Ma 的早始新世，澳大利亚裂离，南极洲向北漂移。在距今约 40Ma 的晚始新世，印度板块与欧亚板块碰撞拼合，特提斯海东段关闭（图 032－1h）。在距今约 18Ma 的中新世，阿拉伯半岛与亚洲主体碰撞，特提斯海西段部分关闭，遗留下西通大西洋的地中海。在距今约 3.5Ma 的上新世，我国青藏高原进入一个以大幅度隆升为主的新阶段，而且抬升速度有越来越快的趋势。此外北美与南美重新连接，巴拿马地峡升起，切断了大西洋与太平洋的直接通道，强烈地改变了大洋水的环流系统。大约自第四纪更新世起，海底扩张加剧，大西洋和印度洋扩张开来，而大陆漂移至今也没有停止。

033 海底扩张说

海底扩张说是 20 世纪 60 年代初兴起的关于穿透大洋岩石圈的洋中脊向两侧扩张，不断形成新洋壳的理论，是关于海洋起源和演化的新活动论学说。这一学说是由美国普林斯顿大学地质系主任赫斯（H.Hess，1962）和美国海军电子实验室的迪茨（R.S.Dietz，1961）几乎同时提出来的。

赫斯曾是一位航海家，在普林斯顿大学任教。第二次世界大战爆发后，他应征入伍加入美国海军，在一艘名为“Cape John-



sou”号的军舰上任舰长，“Johnsou”号曾在太平洋上巡航。早年毕业于耶鲁大学的赫斯，在指挥军舰巡航的同时，仍然不忘探索海洋的奥秘，他应用声纳技术对其巡航的海域进行了深海测量，正是这些实际测量获得的似乎平常的资料和数据，使他悟出了海底扩张的真谛。他在他那篇著名的论文——《大洋盆地的历史》中写道：“大洋不是永恒的单元，大陆却是永恒的，虽然大陆可以被撕开或焊接和发生边缘变形。”赫斯最初设想的海底扩张模式如图 033－1 所示，模式中画入了当时海洋地质和海洋地球物理的许多新事实。在赫斯—迪茨海底扩张说（1962）正式提出之后的短短 5 年中，由于对海底磁异常及海洋地质卓有成效的观测研究，实际上海底扩张说已被证实，并成为地球科学的一项基本事实。

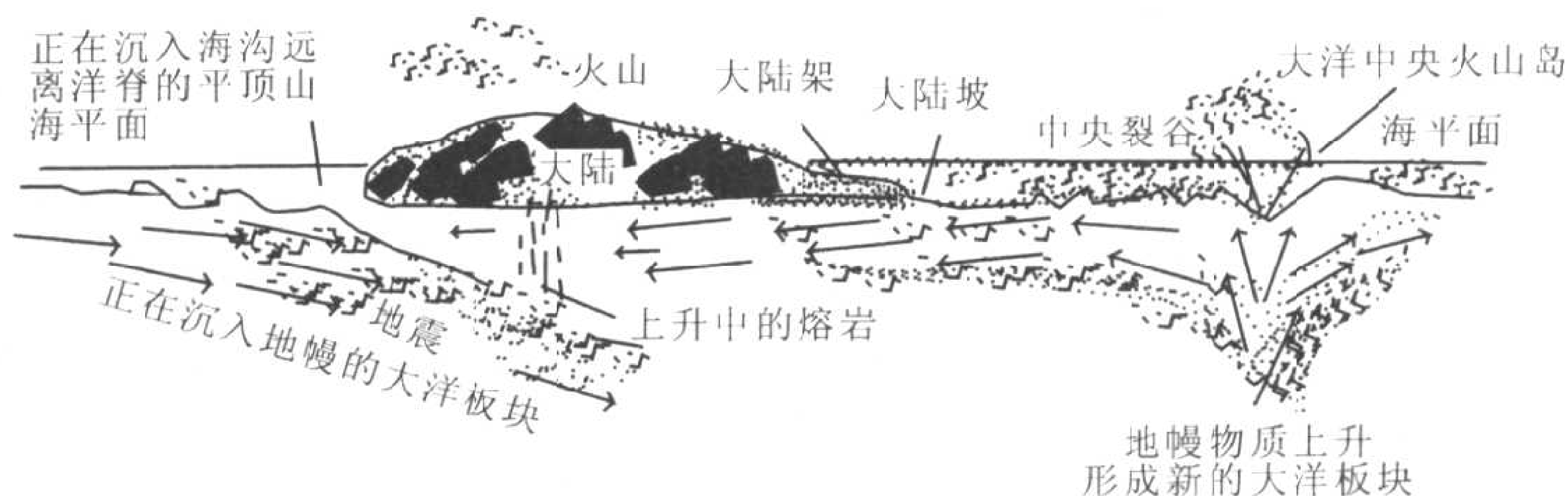
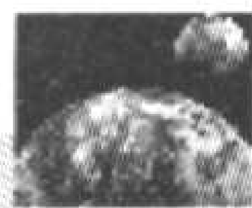


图 033－1　赫斯（1962）的海底扩张模式

海底扩张说认为，大洋地壳的莫霍面不是化学分界面，而是物质相态分界面，这就是说，洋底层 3（玄武岩层）与地幔岩石的化学成分相同,但岩石类型不同，或者是地幔橄榄岩在温度降低至约 500℃时因水化作用而形成的蛇纹岩，或者是地幔榴辉岩① 因压力降低而转变成的辉长岩。因此，除海底极薄的沉积

① 榴辉岩与玄武岩成分相似，但成因不同。玄武岩为火成岩，榴辉岩是由橄榄岩经高温、高压而形成的变质岩。



层外，大洋底是暴露于地球表面对流物质的顶界，是地幔的直接表现。洋中脊是软流圈热对流的上升区及发散区，地幔炽热的岩浆从这里涌出，热流值较高，洋缘的海沟是地幔对流体的下降区，热流值较低，而横切洋中脊的断裂带则是不同区段、不同对流速度的物质因蠕动形成的剪切带[①]。由此可知，洋底就是在洋中脊产生的，洋盆是新洋壳推动老洋壳不断向两侧扩散推挤，导致大洋底不断扩张的结果（图033－2）。洋底不仅比较活跃，而且是主动地移动着，老洋壳则是在地幔对流体上被动运移着，犹如被载于传送带上的物体被动移动着那样，当被传送到对流体的下降传递带时，质量较轻的部分难以下沉而停留在下降传递带之上，同时洋壳在大陆边缘海沟转入地下，使大陆边缘受到压缩，形成褶皱山系，随之“硅铝层”变厚和变形。若大陆之下发生新的地幔对流上升体，则大陆就会产生新的断陷裂谷带，并逐步发展成为新的大洋。

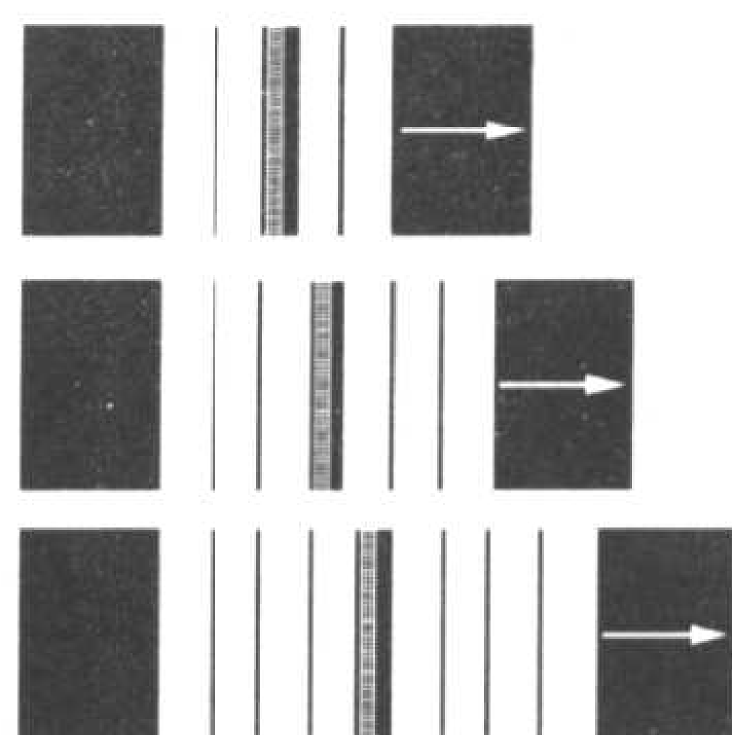


图033－2 扩张中心（洋中脊）推动右（左）板块运动示意图（假设左边板块不动，欲使中脊保持居中位置，则中脊的运动速率应是左边板块运动速度的1/2）

当然这并不是说上述一切完全是基于大洋中脊处所产生的巨大推动力而迫使大洋底部出现大规模水平运动的。洋脊处地幔物质上涌，海沟处地幔物质下降只是物质运动的一种表现，实际上则是地幔流在粘滞力的作用下，像传送带一样推动着岩石圈沿水平方向移动的结果。

按照对海底扩张说的上述理解，结合全球海陆布局，可以把

① 发育在岩石圈中具剪应变（物体上原互相垂直的两微小线段所夹直角的改变量即剪应变）的强烈变形带。

它归纳为如图033－3所示的一幅平面图。洋中脊是地幔对流物

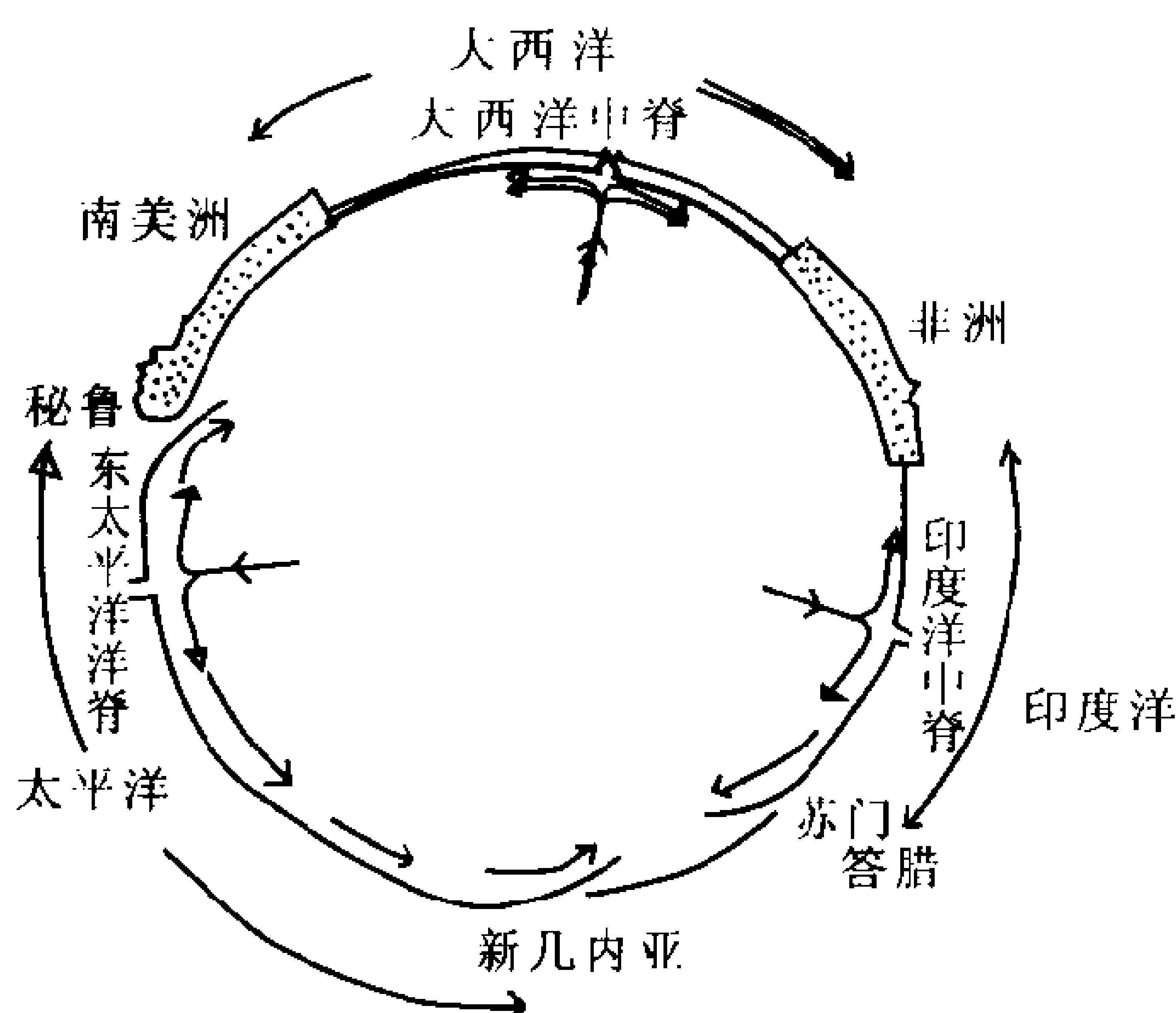


图 033－3　洋脊扩张带与俯冲带在地球上的相对布局

这是一个大致沿赤道切开的地球剖面示意图，可以看到洋脊与俯冲带并非有规律地交替出现，而是有点“古怪”地在地球上相互组合

质上涌的出口，新的海底洋壳就是由这里产生的。新的海底产生后，它就逐渐向中脊两侧扩张，当它达到海沟后则又重新沉降到地幔中去（假设地球的体积和表面积不变）。大洋岩石圈就是这样一面生长，一面消亡，从而构成对立统一的平衡局面的。不过实际上大西洋与太平洋的海底扩张是不同的，大西洋是形成于联合古陆内部的新生洋，扩张着的洋底推动邻接大陆向两侧漂移，大西洋不断展宽；太平洋原来是联合古陆以外的古老大洋，岩石圈一方面在脊顶生长，另一方面又在海沟处俯冲潜没，也就是说，古老的海水和用以盛水的年轻海底之间存在着巨大的年龄反差，通俗的比喻是犹如今天刚做出来的杯子，却盛着20天以前的剩水。

地球表面联合古陆的分裂与大陆的四散漂移，实际上是大西洋、印度洋新生和扩张的结果，太平洋（印度洋）沿岸大陆不是

独立地沿着洋底漂移的，而是和洋底一起在移动着。就这样，海底扩张说在大陆漂移说的基础上，把洋中脊的扩张与海沟岛弧的俯冲联系了起来，其实质是全球洋壳在不断地循环变化，学者们估计 2～3 亿 a 可更新一次。海底扩张速率，依据全球 4 大洋海底磁异常，参照每个磁异常条带的年龄及距中脊的距离可计算出扩张速率，结果是：东太平洋中脊扩张速率最大，平均半扩张速率为 5～7cm/a，印度洋为 2～3cm/a，大西洋为 1～2cm/a，北冰洋在 1cm/a 左右（图 033－4）。

图 033－4　全球洋中脊半扩张速率图
（引自刘本培等，2001）

034 海底条带状磁异常

由洋底岩石磁化方向不同而引起的呈条带状分布的磁异常即条带状磁异常，它是大洋盆地中广泛存在的一种磁异常。条带状磁异常最早由英国地球物理学家梅森（R.G.Mason）等人于 1958 年首先发现于东北太平洋（图 034－1），它与大陆上复杂的磁异常分布有明显不同。

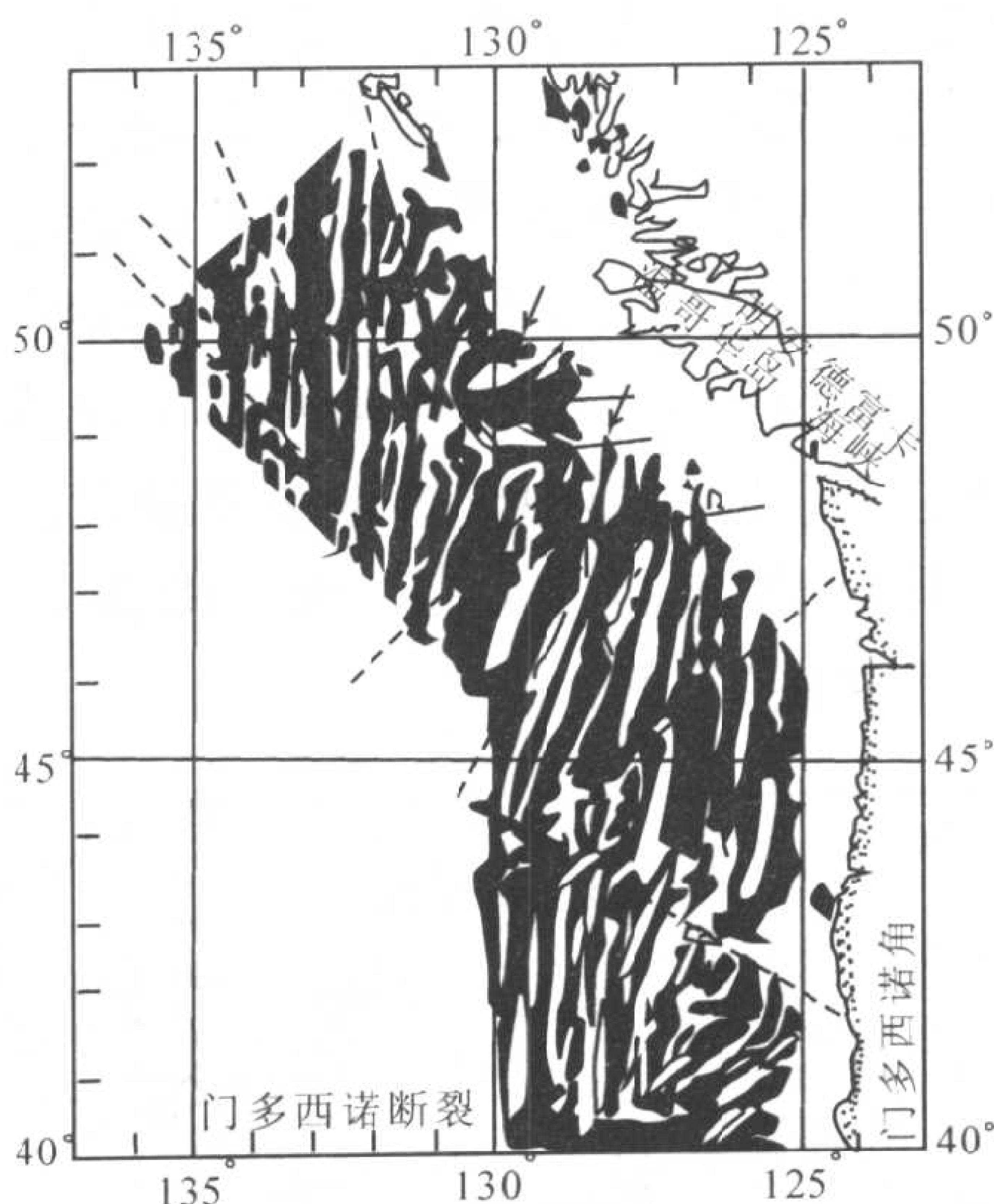


图 034-1 东北太平洋的条带状磁异常

正（黑）负（白）磁异常相间，直线表示错开磁异常的断裂带，

箭头标出了较短扩张脊轴位置

条带状磁异常的主要特征是：以大洋中脊为中心，两侧对称地交替分布着正磁极性（磁极与现代一致）与反磁极性（磁极与现代相反）两类异常，正负相间，相互平行，并且离洋中脊越远，岩石年龄越老。现以冰岛凯夫拉维克西南约 350km^2 处，由 58 条航磁测线所编制的磁异常图（图 034-2）为例说明如下：大洋中脊轴部 AA 磁异常（平行中脊轴线）特别显著，相互平行，正负相间，异常强度较大，为 3000γ（伽玛），宽约 40km；BB 之间，即 AA 两侧各有 12 个呈平行对称分布的磁异常条带，每个宽约 15km，异常强度较小，为 500～1500γ，翼部为线条性较差、波长较大的磁异常。各异常剖面之间可以长距离逐个地进行对比（图 034-2 中的点线），其线条性和定向性均很明显。当然，在遇到洋底断裂带时，异常是可以被整体错断的，虽然错断带长度



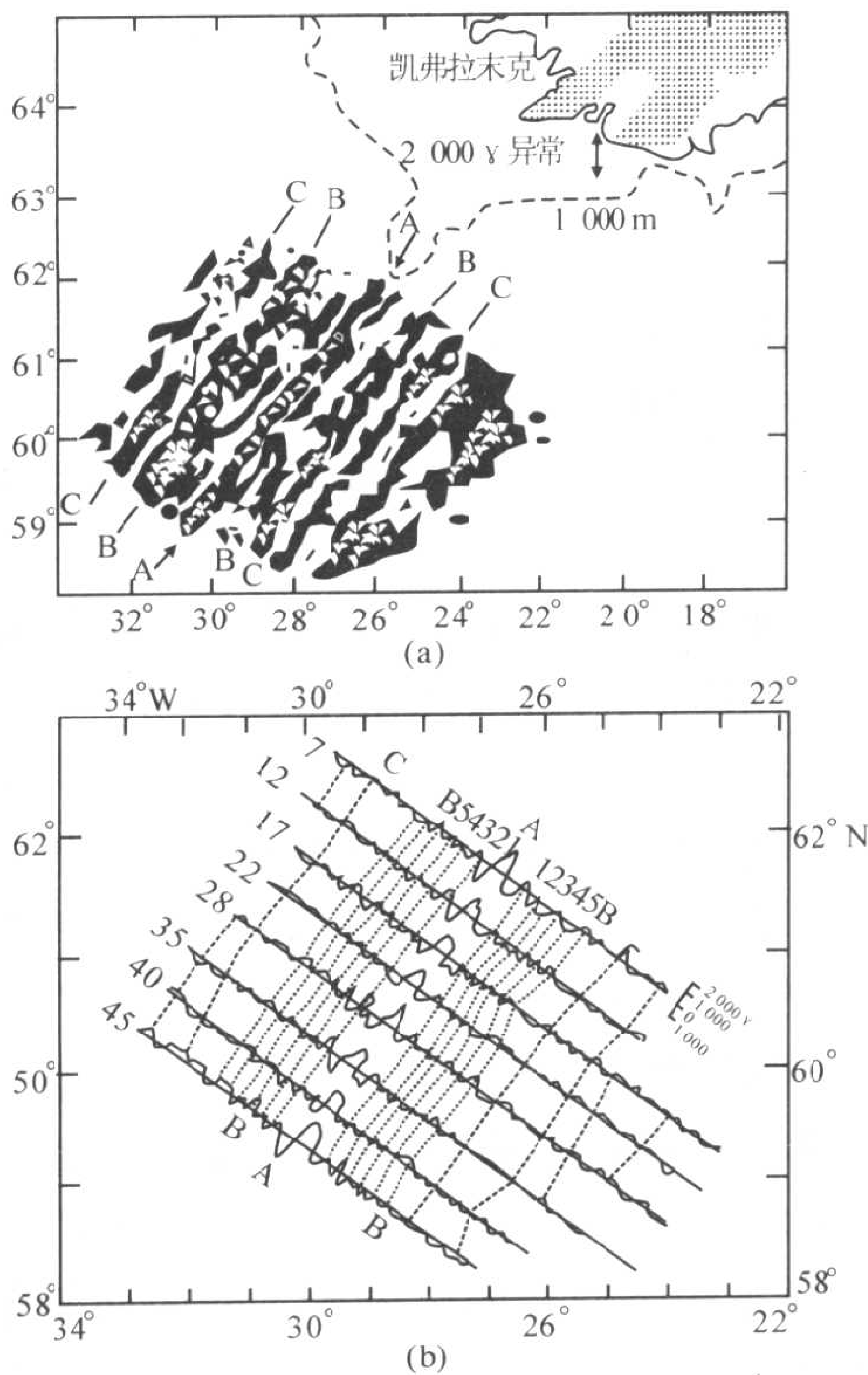


图 034－2　冰岛南部雷克雅内斯洋脊上的磁异常分布

(a) 平行于大西洋中脊的条带状磁异常（黑色为正异常，白色为负异常）；

(b) 示垂直脊轴 AA 的磁异常平剖面图

可达数百到千余千米，但错断的异常剖面相互间仍可追踪对比，并据此可以得出错开的幅度。

条带状磁异常广泛分布于全球 4 大洋中，也见于边缘海及弧后盆地中，如菲律宾海和我国南海等。条带状磁异常以大洋中脊最为典型。4 大洋中除印度洋中脊西南支外，其他洋中脊都有一组以平行于洋中脊方向延伸，并呈对称分布的磁异常条带。那么为什么会形成如此规模、如此规律的磁异常条带呢？对此，当时的学者真可谓绞尽脑汁，提出了各种不同的解释，但都遭到了否定，只有英国剑桥大学大地测量和地球物理系的两位青年学者瓦因（F.J.Vine）和马修斯（D.H.Mathews）提出的解释模型最终放了异彩。

英国是使大陆漂移说东山再起的故乡。当瓦因还是剑桥大学

的学生时就对大陆漂移说十分赞赏。随后瓦因成了剑桥大学以布拉德（E. Bullard）为首的海洋研究组的研究生，并于1962年参加了欧文号海洋考察船对印度洋卡尔斯伯格中脊的地磁调查，而马修斯则是与瓦因共住一室的研究顾问。这两位勇于探索的年轻人，不但用计算机处理了印度洋卡尔斯伯格中脊的大量磁力异常数据，而且还分析对比了大西洋和太平洋的有关资料，就这样，一个崭新的洋底磁异常解释模型——瓦因—马修斯模型就酝酿成熟了。

瓦因和马修斯认为，海底异常条带不是由于海底岩石磁化强弱不均所引起的，而是由周期性正、反向转向的地磁场所引起交替磁化的熔岩（玄武岩）条带产生的，是地磁场不断倒转、海底不断新生和扩张的结果。也就是说，地磁正负异常对应于古地磁场的正反方向变化，而条带状磁异常则是地球磁场正、反系列在“传送带”上的水平投影。产生的过程是：当地幔物质沿中脊上涌形成新洋壳熔岩，并冷却到居里温度以下时，必定会受到沿当时地磁场方向的磁化，如果当时的地磁场是正向的，则获得正向极性，如果是反向的，则获得反向极性。这些已被周期性转向磁化的岩熔条带，随着洋中脊新洋壳熔岩的生成而不断向两侧推移，就成了对称于洋中脊呈平行分布的磁异常条带图式，也就是说，海底条带状磁异常图式是由在相反方向上磁化的海底条带造成的，可以用海底扩张和地磁场转向理论来解释。

为了检验瓦因—马修斯模型的正确性，瓦因和威尔逊（J.T.Wilson）将加拿大温哥华岛外的胡安·德高卡洋中脊的磁异常条带与考克斯的地磁年表进行了对比，发现海底正、负磁异常的排列顺序不仅与地磁极性年表一致，而且正、负异常的宽度与地磁年表中正、负极向时间的长短成正比。在海底扩张速率没有太大变化时，时间间隔越长，相对应的海底磁异常条带宽度就越宽，如果选定一个合适的扩张速率，那么根据地磁年表就可以从



理论上定量地计算出海底磁异常剖面，然后对此剖面进行地磁实测，并把二者加以比较后发现，一致性大于差异性，这就是图 034 – 3 中理论剖面（计算剖面）与实测剖面所表现的那种非常巧妙的一致性。这种一致性不仅在东太平洋海岭如此，在大西洋海岭（雷克雅内斯海岭）、印度洋海岭、南极海的海岭也都如此。虽然一致性的程度有所不同，但从倒转史的绝对时间反过来求扩张速率值还算是成功的。

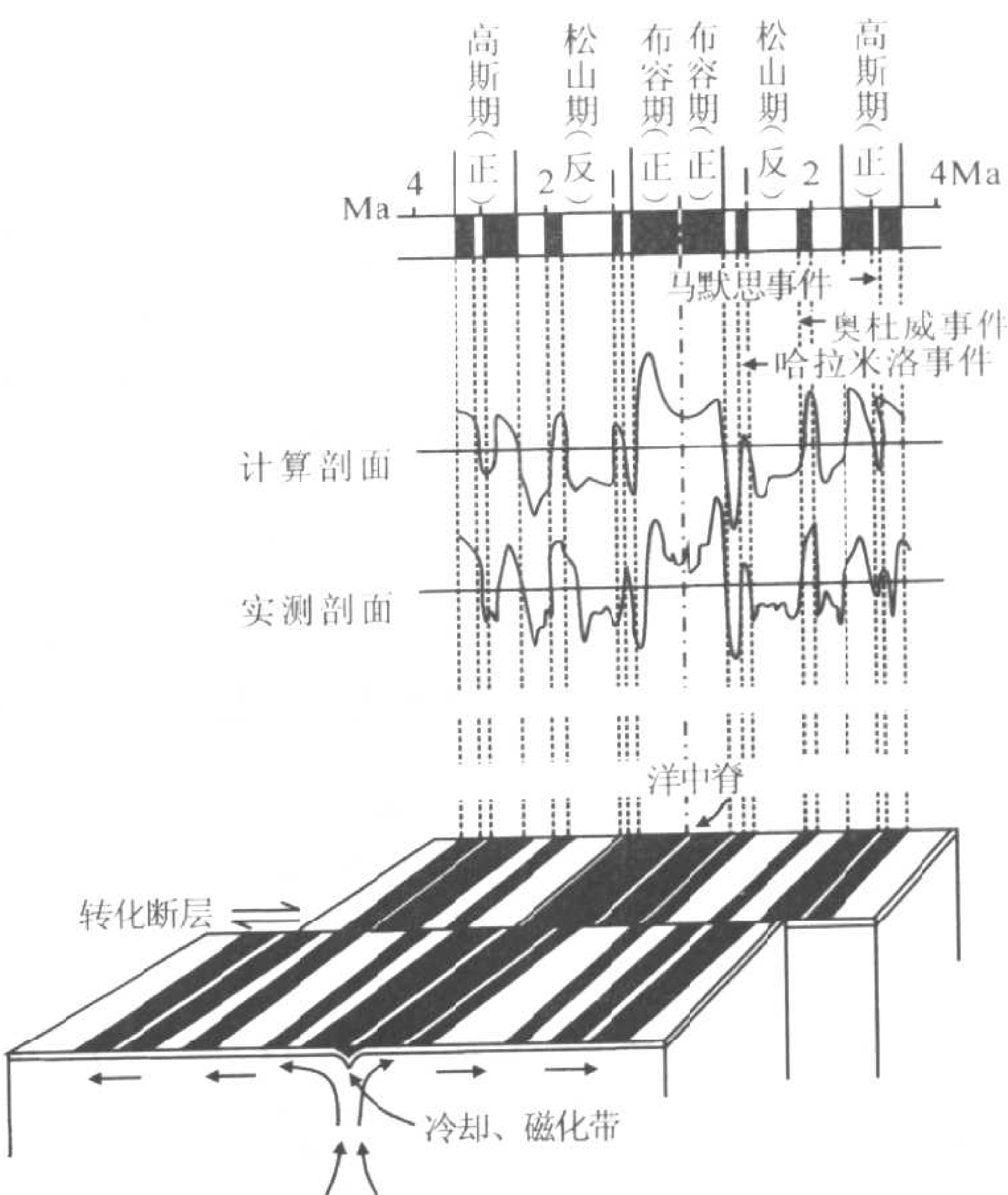


图 034 – 3　图示条带状磁异常原理

（在各点计算了理论场与局部场之差后，将实测剖面与交替磁化条带构成的计算剖面加以对比）

对深海沉积物磁化方向的测定也可以检验瓦因—马修斯模型。图 034 – 4 就是美国拉蒙特地质研究所的奥普代克（N.D.Opdyke，1966）对南极海海底土层岩心所进行的剩余磁性的测定结果。

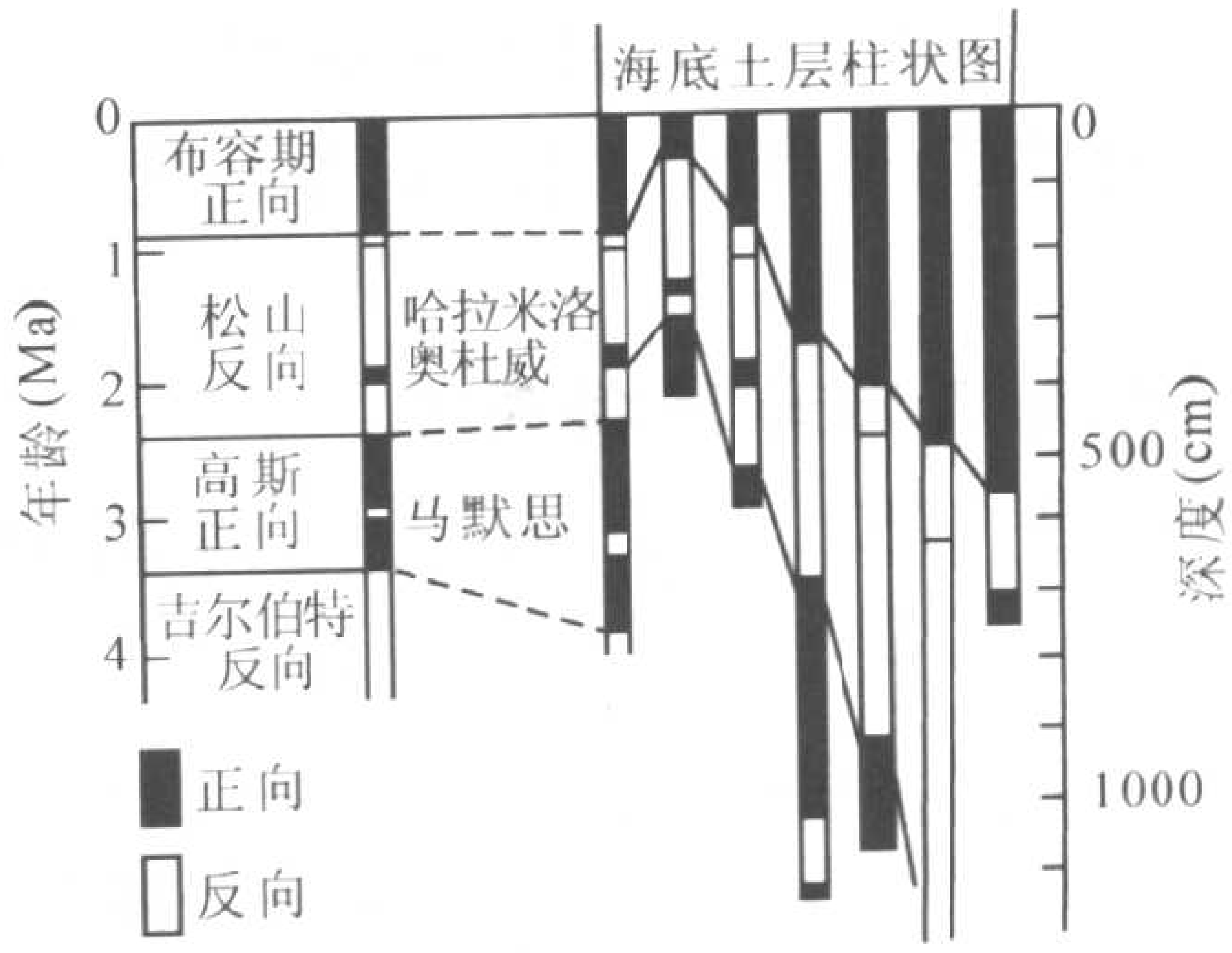


图 034 – 4　南极海海底沉积物的磁化对比

不难看出，海底沉积物的正、反交替磁化现象亦非常明显，不仅可分出近代吉尔伯特时期的正、反向极性期及短暂的反转事件，而且海底沉积层中正、反磁化段的厚度还可以和地磁年表中正、反向极性期的时间长短以及与磁异常条带的宽度相对比。这样，上述三种地磁测量数据，即陆上熔岩地磁极性转向年表中的时间间隔（几万年或几十万年），海底条带状磁异常的宽度（几千或几十千米的平均距离）及深海岩层岩心正、反向磁化段的厚度（几厘米或几米的垂直长度）都取得了相互一致，即"三位一体"的定量比例关系①，这也正是瓦因—马修斯模型假定海底扩张速率均匀不变时所设想的，这一设想和由设想而来的预见，后来都被更多的海洋磁力测量以及深海钻探和同位素年龄测定结果所证实。

瓦因—马修斯模型最早发表于 1963 年 9 月，不久在一次讨论会上有人质问年仅 25 岁的瓦因："你对这些数据的精确度做过统计没有?"瓦因回答说："我不做统计，我只是根据事实行事而已。"事实上在 1963 年以后的短短几年内，有关模型的研究论文和资料像雪片似的飞向各地球科学刊物及地质学和地球物理学年会。它们都证明，海底是扩张的，大陆是漂移的。所以 1967 年威尔逊宣布，地球科学发生了一场革命！欧美地质学界的一些人则把 1967 年当作地球固定论转变为地球活动论的一个转折年。



035 威尔逊与转换断层

自 1952 年美国学者梅纳德（H.W.Menand）及迪茨

---

① 若海底扩张速度和沉积速度均匀不变，则海底地磁条带宽度和海底沉积物地磁异常厚度与相应地磁场持续的时间成正比，两个相邻地磁场正、反向极性时间之比与相应海底地磁异常正、反向条带宽度之比和相应海底沉积物正、反向磁异常厚度之比是一致的。

(R.S.Dietz)，在北加利福尼亚海岸外的东北太平洋发现第一条切截大西洋中脊的横向断裂——门多西诺断裂带以来，世界各大洋都陆续发现了一系列这类横切洋中脊的断裂带。这些与脊轴近于垂直的水平断裂带，长而平直，长的可达数百到数千千米，一般可达数十千米，切割深度也很大，至少都切穿了大洋地壳，在海底地形上，断裂带呈现为岭脊和狭窄的沟槽或岩壁。

由于上述断裂带多出现于大洋中脊区，而洋脊轴部又是海底扩张中心，也就是说，断裂带切开的并不是一般的海域，而是由不断向两侧扩张的洋脊引起的具有相对运动的非正常海域，因此，它必定与传统地质学中常见的一般平移断层① 的性质不同。据此，加拿大学者威尔逊（J.T.Wilson）于1965年提出了一个全新的断层名称——转换断层。转换断层的发现及命名是与威尔逊多年的细心研究和敏锐观察以及他那深厚的物理学功底分不开的。

J.T.威尔逊，加拿大地球物理学家，1908年生于渥太华，1932年毕业于多伦多大学，1936年获美国普林斯顿大学哲学博士学位，是美国国家科学院外籍院士，曾任国际大地测量和地球物理学会主席。早年的威尔逊是专攻物理学的，由于他非常热爱大自然和山野旅行，所以后来就转向了地球科学领域，并最终成为这一领域最具敏锐洞察力的科学家和创造性贡献最多的资深学者。由他提出的转换断层的新概念即为其最具创新性的贡献之一。那么威尔逊转换断层的新概念是什么呢？威尔逊说：“转换断层就是那种位移突然终止或者改变形式和方向的平移断层。”

① 平移断层也称走向滑动断层，简称走滑断层，是断层两盘沿断层面走向相对滑动的断层。按两盘相对位移的方向可分为左行平移和右行平移断层，前者两盘显示左旋，即逆时针方向旋转；后者两盘显示右旋，即顺时针方向旋转。

换句话说，转换断层就是在断层转换点转为走向不同、力学性质亦不同的“平移断层”，如图035－1所示，左图为转换断层，右图为平移断层，二者的区别如下。

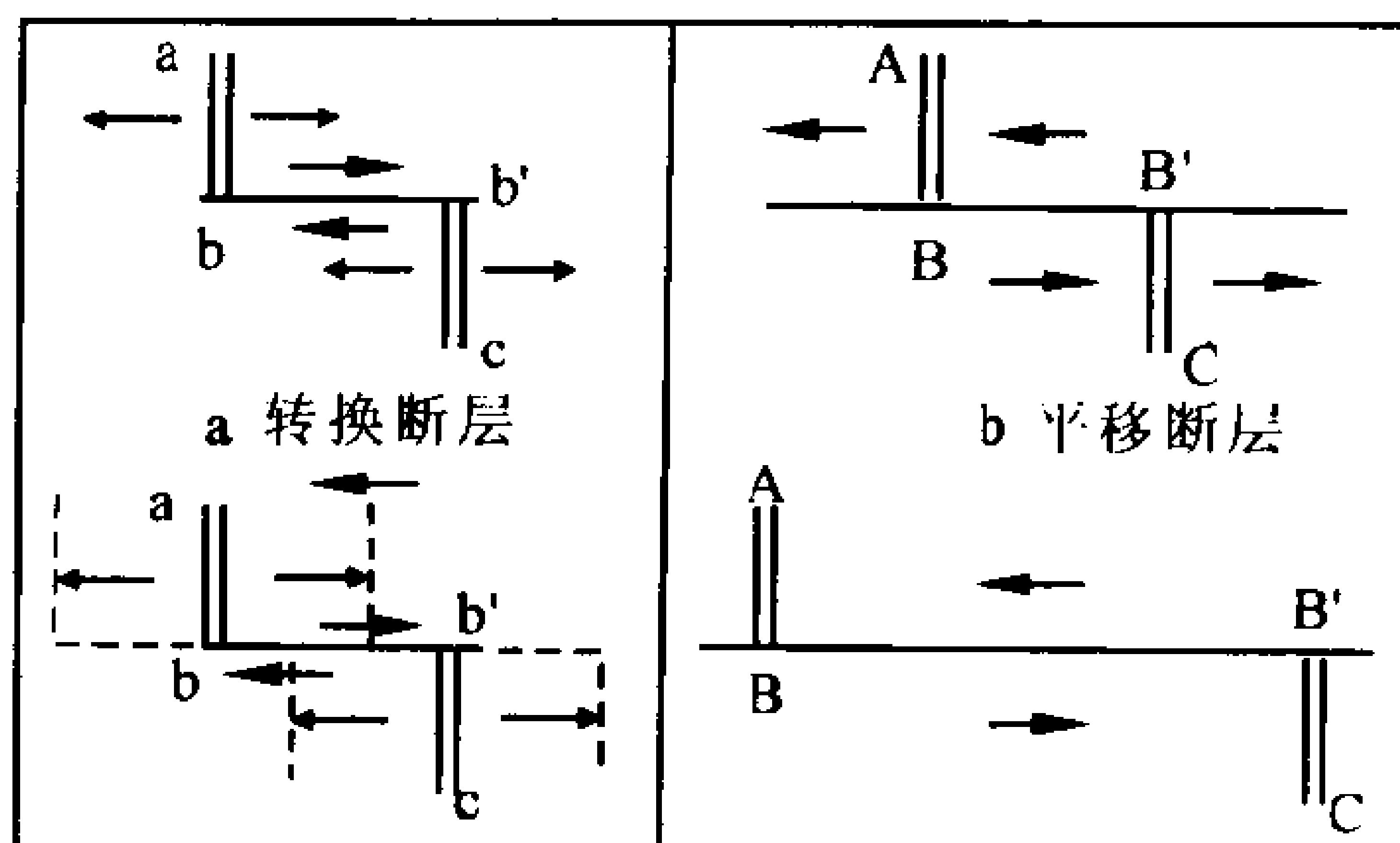


图035－1　转换断层和平移断层对比

1. 平移断层沿整个断裂带的两侧长度都发生剪切错动，而转换断层的错动则仅局限于脊轴之间bb′段与脊轴相交处，即在b和b′点错动终止。

2. 转换断层与平移断层的错动方向相反。转换断层为右旋错动，平移断层为左旋① 错动。威尔逊特别强调这一点，因为这正是转换断层与平移断层的根本区别所在。

3. 平移断层随着断层运动时间的增长会使脊轴之间的错开距离（BB′）越来越大，而转换断层的bb′长度一般不会随时间增长而变长。

既然转换断层与平移断层的运动方式如此不同，那么由这两种断层产生的地震分布也必然不同。美国拉蒙特地质研究所的赛克斯（L.R.Sykes）在分析了全球洋中脊系统所发生的17个地震的震源机制后发现，断裂带的地震都是浅源地震（图035－2），并只发生在洋中脊轴部和被错断的洋中脊之间的断裂带（bb′）上，其外延地段基本上没有地震发生。洋中脊轴部的浅震由拉张（趋向于把物体拉裂的应力）引起，脊轴之间断裂带上的地震由水平剪切，即与水平截面相切的应力所产生，错动方向与转换断

① 设自己站在断层面一侧，看另一侧的运动方向，向左运动为左旋，向右运动为右旋。



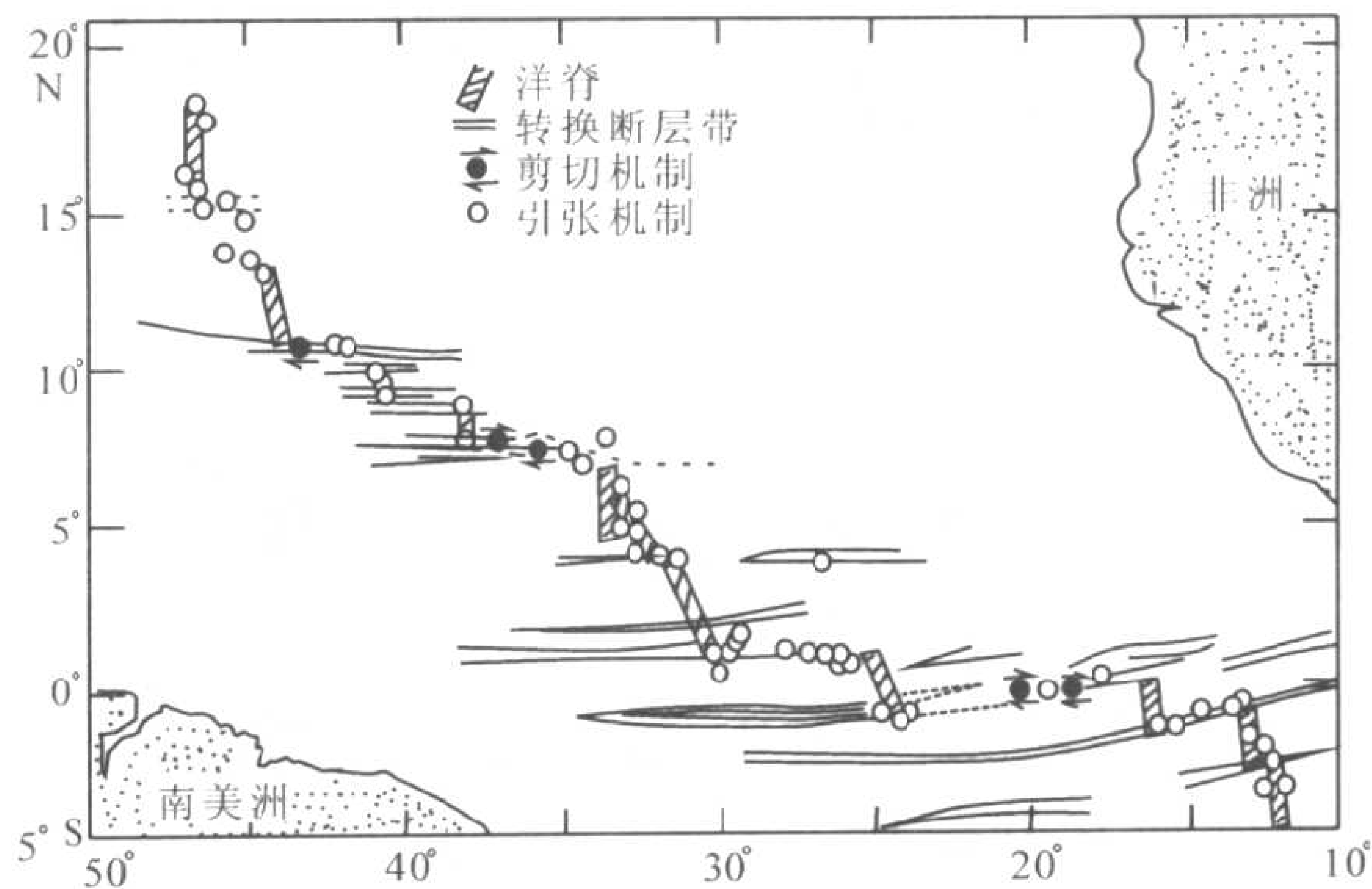


图 035－2　北大西洋中脊转换断层上地震震中分布图
(地震大部分集中在洋脊部位或两个洋脊间的转换断层上，震源机制表明，发生在洋脊上的地震属伸展型，发生在转换断层上的地震属剪切型，二者均为浅震)

层所要求的方向完全一致，证实了横切洋脊的断裂带确属转换断层性质。

为了从实地上检验转换断层的存在，威尔逊还对美国西部有名的圣安德列斯大断层进行了剖析。威尔逊认为这个断层不是一般所说的平移断层，而是右旋转换断层，它的南端为加利福尼亚湾的东太平洋中央海岭，它的北端则应在加拿大西海岸外与一洋中脊相连接。后来他与英国剑桥大学的青年学者瓦因，一老一少，相互合作，果然在圣安德列斯断层的北端发现了很好的磁异常条带的对称轴，这就是戈达洋脊和胡安·德富卡洋脊（图 035－3）。这两段洋中脊的发现也解除了当时

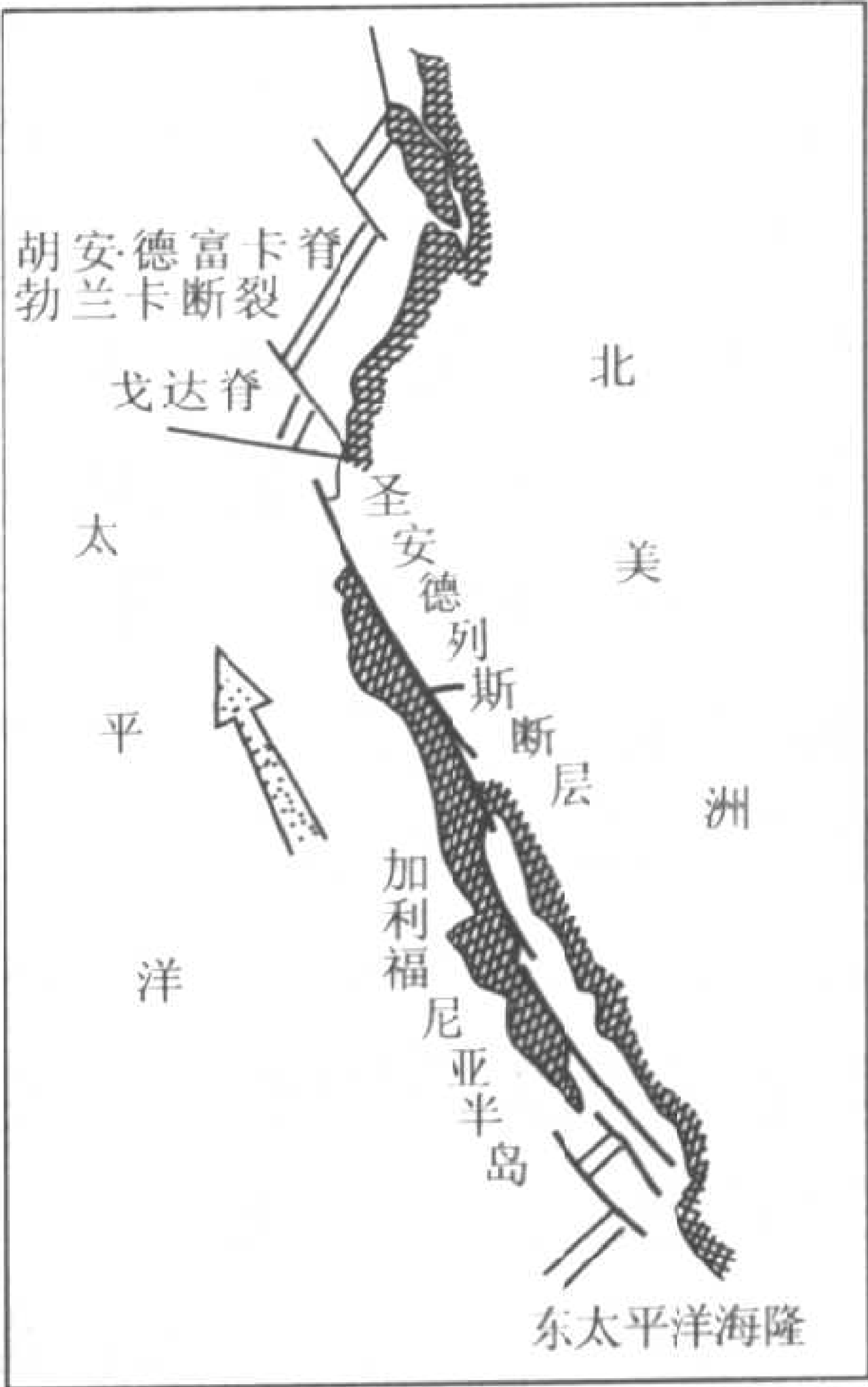


图 035－3　圣安德烈斯转换断层是一条右旋洋脊—洋脊型转换断层（J.T. 威尔逊，1965）

瓦因—马修斯模型中，关于东北太平洋线状磁异常条带虽然存在，但并不平行于任何大洋中脊的疑问。

转换断层是以其平移段的运动方向和与两端构造带组合类型来分类命名的。横断中脊的断裂带是最常见的一种，称中脊—中脊（D—D）型转换断层，它主要分布于洋底，但在大陆上也能见到它的踪迹，如前述的圣安德列斯大断层。此外还有连接中脊与海沟（沟弧）的中脊—海沟（D—S）型转换断层，以及连接海沟与海沟的海沟—海沟（S—S）型转换断层。据沟弧形态又可区分为三种类型。这就是说上述共有6种组合类型（图035－4），但转换断层是有右旋（右行）和左旋（左行）之分的，也就是说，右旋有6种，左旋也有6种，共12种混合类型。这12种组合类型体现了转换断层的中脊—中脊型、中脊—海沟型及海沟—海沟型（图035－5）三种类型板块边界间岩石圈的消长变化，有的增长，有的不变，有的缩减。

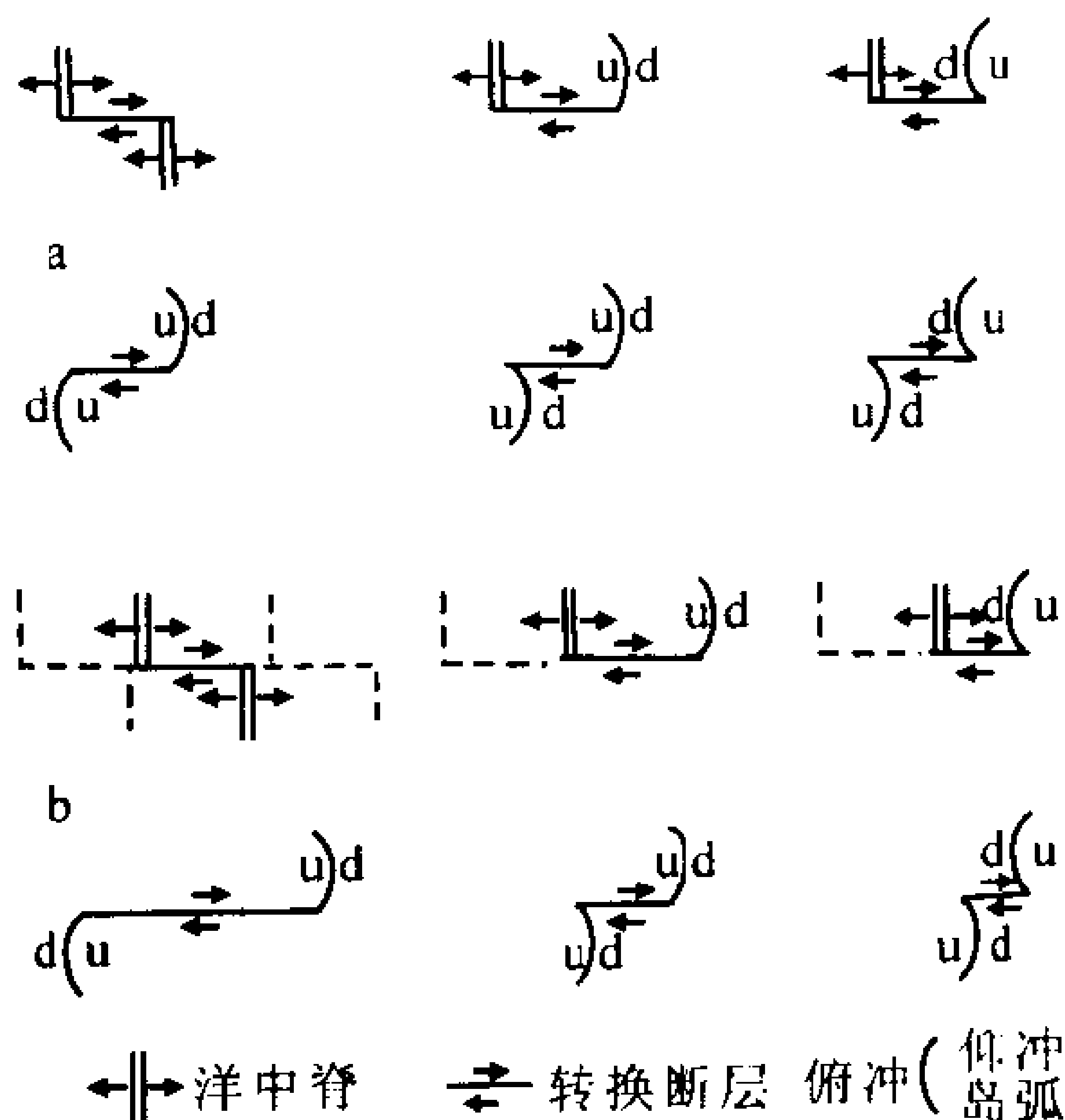


图035－4　右行转换断层的6种类型（a）及演化后的空间关系（b）（图中d代表下，u代表上）

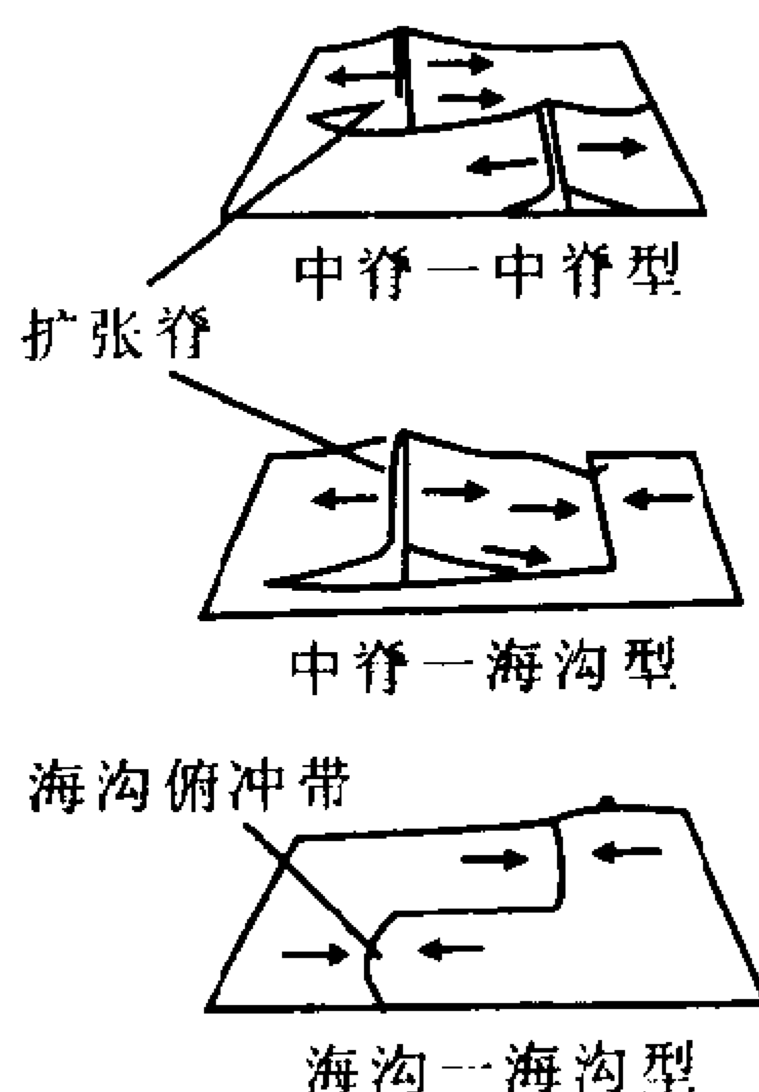


图035－5　三种转换断层类型

转换断层是由海底扩张引起的，断层两侧海底平移的方向就是海底扩张的方向，所以转换断层的提出为证实海底扩张、确立板块构造奠定了基础。



036 海底年龄与深海钻探验证

既然陆上熔岩的地磁极性年表能够确定距今 400 万 a 以来的地磁异常年龄，那么中生代以来洋底条带磁异常的年龄也是能够被确定的，这就是说，广布于洋底的条带磁异常所反映的，其实是海底年龄的年轮，近似于等时线。图 036－1 即为由海底磁异

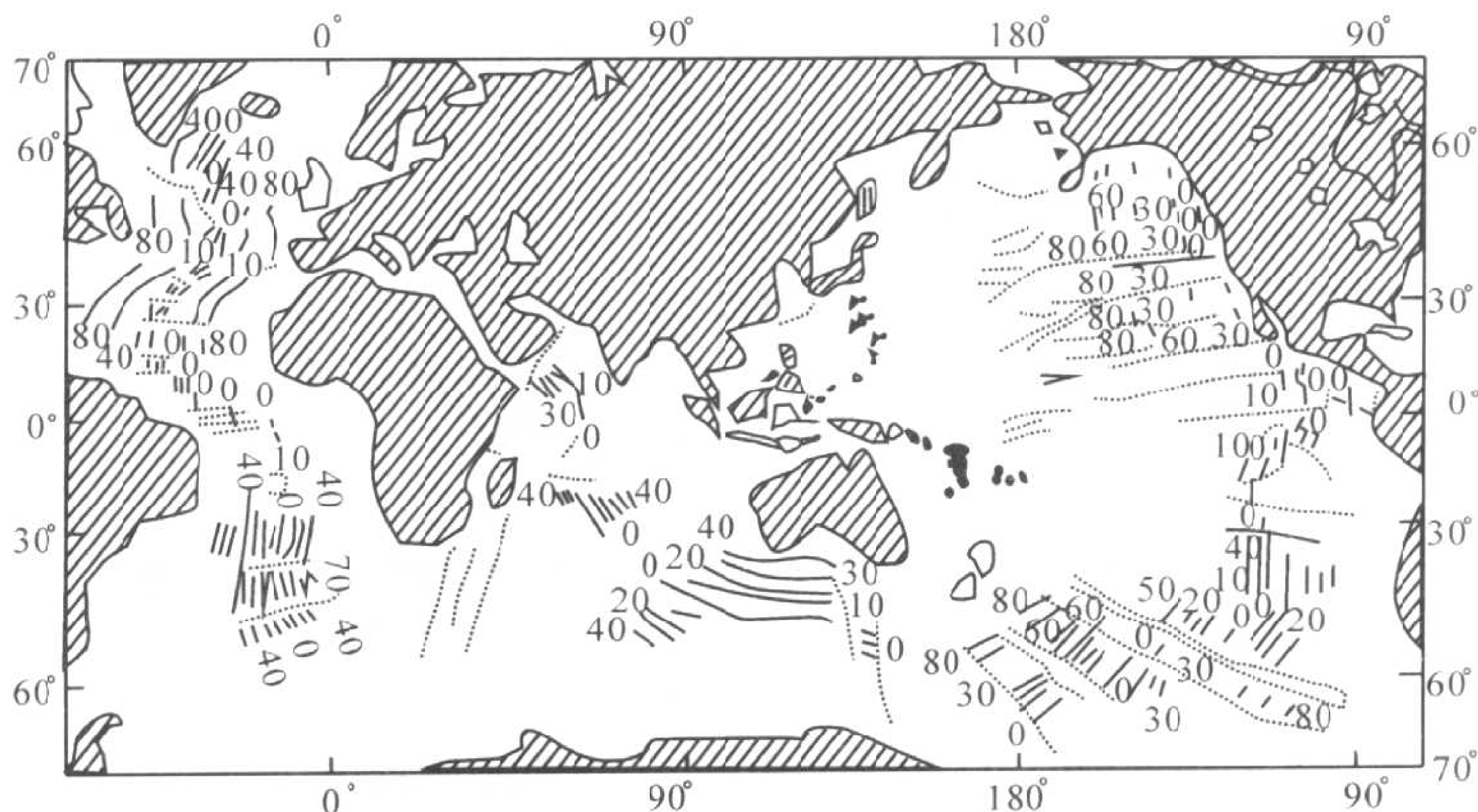


图 036－1　海底条带状磁异常推断的洋底等时线

（图中数字单位为 Ma，点线为断裂带）

常条带确定的洋底年龄等时线图。不难看出，洋底岩石年龄自洋中脊向两侧呈对称性增大，说明海底是不断扩张的。然而由于洋底地磁年表是以海底扩张说为理论基础，以南大西洋洋底平均扩张速率（2cm/a）① 为恒定速率，然后将每个条带磁异常至洋中脊轴的距离除以上述恒定速率而得出其年龄值的，因此所做出的洋底年龄图是否符合海底年龄的实际还需要进行深海钻探验证。

① 有证据表明，南大西洋在距今约 1000 万 a 的时期内，恒定地保持着 1.9cm/a 的平均扩张速率。这一恒定速率已得到深海钻探的检验。

深海钻探是20世纪60年代开始至80年代结束的一项深海钻探计划（DSDP）。该计划由联合海洋机构地球深层取样计划（JOIDES）指导，由有动力定位设备的“格洛玛·挑战者”号钻探船负责钻探，共历时15年（1968～1983），航行96个航次，航程超过60万km，钻探钻位624个，采取岩心长度9.5万m。可以说除冰雪覆盖的北冰洋外，钻孔遍及世界各大洋。图036－2即

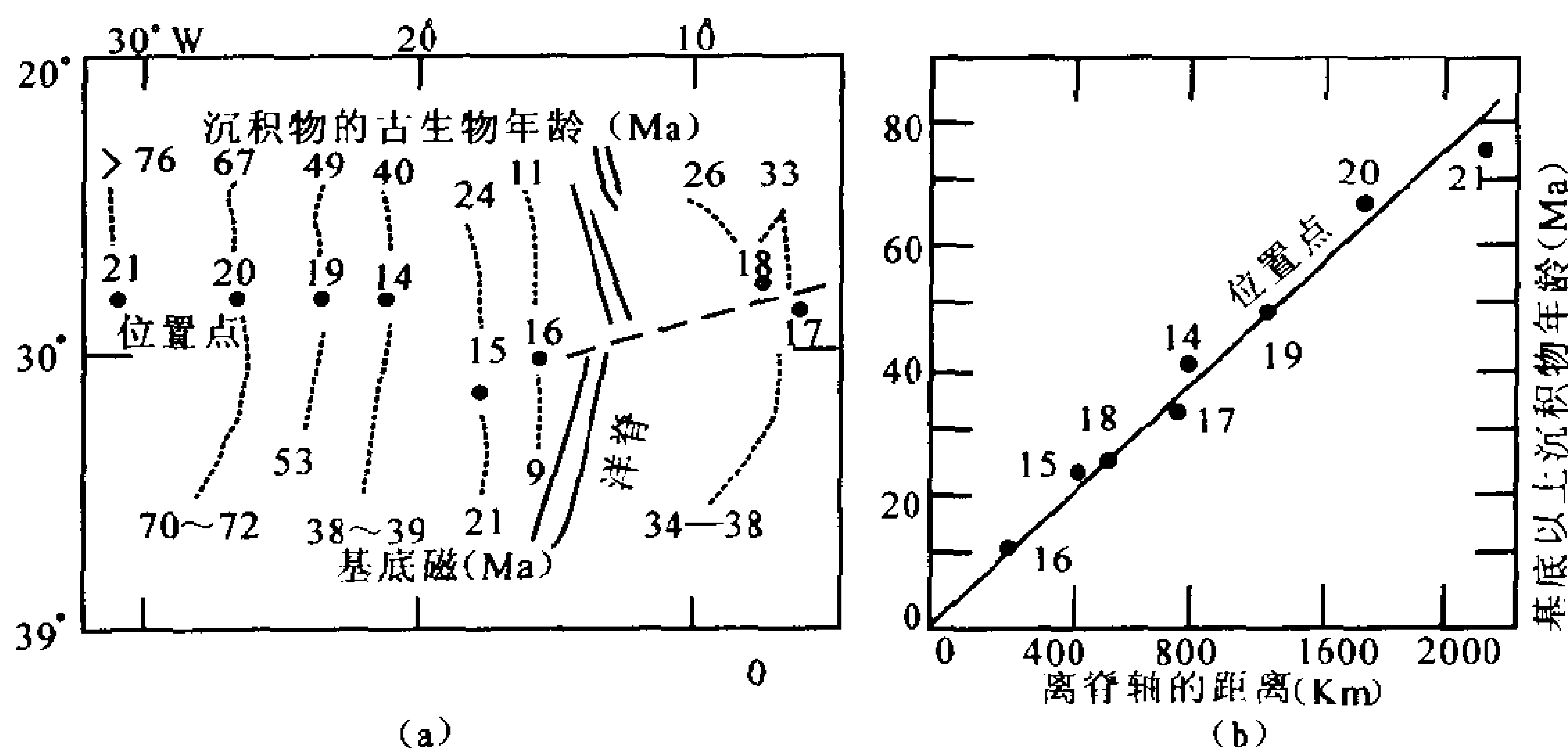


图036－2　南大西洋第三航次深海钻探图

(a) 钻孔站位及年龄；(b) 沉积物年龄与脊轴垂距关系

(说明有恒定扩张速率，2cm/a)

为南大西洋第三航次深海钻探成果之一，就是这一航次实证了海底扩张理论，成为地球科学研究中最辉煌的成果之一。钻孔站位定位于南纬30°附近，在横越大西洋中脊测线上有明确划定的磁异常图像内，共有8个钻孔取得了岩心（其中7个打到了玄武岩基底）。由于沉积物中含有大量的微体化石可以确定沉积物的时代（地质时间标尺），从而发现，不仅玄武岩基底的磁年代与基底之上最底部沉积物的古生物年代一致，而且沉积物的年龄与沉积物距洋中脊轴的距离呈线性关系，离脊越远，时代越老。

南极海域的深海钻探也同样证实了海底沉积物自中印度洋洋中脊向外，即钻孔位置越向南，其年龄越大的趋势，比如自北而



南的 265 孔为 1300 万 a，266 孔为 2400 万 a，267 孔为 4200 万 a，268 孔为 5000 万 a。因 268 孔已接近南极，所以其时代最老。

由于有了上述深海钻探资料的支持，经同位素年代学、古生物学及磁性地层学等多方面的研究，不仅做出了太平洋北部的洋底地质图，而且编制出了世界大洋洋底年龄图（图 036－3）。这些图同样表明，洋底地层年龄及同位素年龄均在洋脊两侧呈对称分布，距中脊愈远，时代愈老。太平洋最老的洋底（侏罗系）位于西太平洋日本海沟和马里亚纳海沟以东海域；大西洋最老的洋底位于北大西洋靠近美洲和非洲北部的海域；印度洋最老的洋底则位于它的东北部。所谓最老的年龄，迄今的深海钻探证实，也均未超过侏罗纪，约为 170Ma，与大陆最老的岩石年龄 3800Ma 相比，洋壳比陆壳年轻多了。这意味着占整个地球表面面积的 60%的洋底，竟是在不到 1/20 地球历史的近期所形成的，这是何等的年轻化！这表明洋底确实是在不断地生长，不断地更新着的。

实际上，如果将世界大洋中脊的平均扩张速率假定为 3cm/a

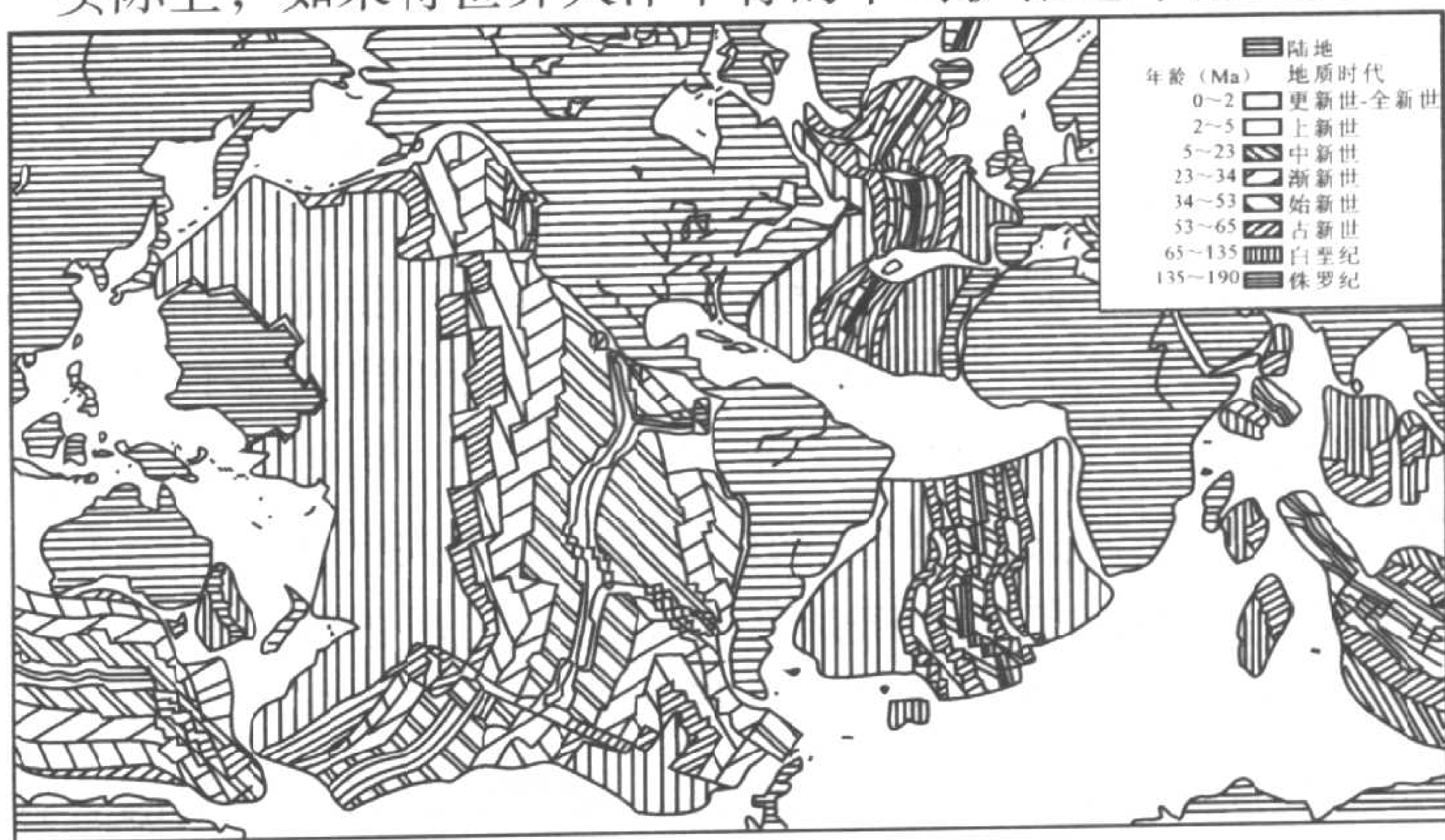


图 036－3　世界大洋洋底年龄图

(这完全是可能的)，则在世界大洋中脊约64000km的长度上，每年因海底扩张而新生的洋底总面积大约是$2km^2$，这样用不了170Ma就足以生长出大于$3\times10^8km^2$的新洋底了。这一面积与当今世界大洋洋底的总面积（约$3\times10^8km^2$）是大体一致的。当然深海钻探也发现了一些与理论预测年龄不完全符合的地方，局部海区的钻探结果与磁异常年龄资料有偏离，洋底磁异常也未必都是由洋壳第二层上部玄武岩所引起的。然而，这并不影响海底磁异常与洋底年龄之间的对应关系，也不影响随着远离大洋中脊，洋壳年龄呈线性增加，上覆沉积物底部层位时代逐渐衰老，沉积物增厚的整体对应关系。

037 海洋的起源和发展阶段

海洋的起源问题是地球科学的重大基础理论问题之一，有种种假说，比较有代表性的假说是美国地质学家丹纳（J.D.Dana）的大洋永存说和俄罗斯大地构造学家别洛乌索夫（B.B.Ъелоусоъ）的大洋化假说。丹纳是地槽学说的创始人之一，他的大洋永存说与大陆固定说是一回事，此已为20世纪60年代以来的深海钻探及洋底拖采成果所否定。大洋化假说的倡导者别洛乌索夫也是大陆固定说的强势学者，他认为：地壳的发展有两种不同的作用，一是原始地球通过泛地槽作用生成硅铝质花岗岩层（花岗岩化作用）即大陆地壳，泛地槽持续到古生代末，那时全球皆被大陆地壳所覆盖，太平洋、大西洋、印度洋在当时还不是大洋；另一是陆壳崩解生成玄武质岩层即大洋化作用，它始于中生代初，那时大陆地壳被破坏，与来自地幔的物质组分（基性-超基性岩浆）混合、渗透，变质加重，并逐步脱离陆壳而深入地幔之中。陆壳沉降之处形成洋盆，随着玄武岩浆的喷溢，洋盆底部覆盖上一层玄武岩层，这便是大陆地壳的基性岩化作用或大洋化作用。很明显，别洛乌索夫的大洋化假说其实质也是固定

论，它虽然把大洋形成年代说成是中生代，解释了大洋底的年轮化现象，但无法解释洋底年龄和沉积层或玄武岩相对洋中脊的对称分布，也无法解释厚而轻的大陆地壳怎么会如此大规模地垂直陷落，因为即便是陆壳与地幔组分的混合也仍然是比地幔物质为轻，是不会垂降沉入地幔中的。

20 世纪 60 年代大陆漂移说的复活，海底扩张说的被证实，使人们对大洋起源和演化的认识有了根本的改变。前已述及，大约 2 亿 a 前，全球只有一个古陆——联合古陆（泛大陆）和一个大洋（泛大洋）。当时还没有大西洋和印度洋，现今的大西洋和印度洋是联合古陆裂解后形成的，因此，它们是年轻的大洋，其年龄不大于 1.8 亿 a。现今的太平洋是泛大洋的剩余部分，从洋盆的历史看，它可以追溯到 7 亿 a 左右的新元古代，然而深海钻探和洋底条带状磁异常的年龄测定表明，太平洋洋底年龄不大于 2.0 亿 a，如此，海水是古老的，洋底却是年轻的。物质不灭，洋盆中的古老洋底到哪儿去了呢？通过大量海洋地质及海洋地球物理探测，发现更古老的太平洋洋壳已通过洋缘的俯冲作用又重新潜没于地幔之中了！事实上当地球表面积恒定不变时，随着大西洋和印度洋的张开，太平洋势必要收缩合拢，否则地球表面就会一直膨胀下去了，此于现今地球的似球形有矛盾。至于收缩量，据有关学者测算，中生代以来，从古太平洋演变到现今的太平洋，其面积大约减少了 1/3，也就是说，大西洋和印度洋的面积向西扩展了原古太平洋的 1/3，即每年有大约 $2km^2$ 的地球表面积被消减或被压缩了。

上述太平洋、大西洋和印度洋的这种扩张—消减的全过程，最早为 J.T. 威尔逊所注意到，他按照大洋盆地的生命周期及演化历程，把大洋划分为两个发展阶段，即成长阶段和衰退阶段，每个阶段又划分为三个期（表 037 - 1）。成长阶段的三个期依次是胚胎期（Ⅰ）→幼年期（Ⅱ）→壮年期（Ⅲ）；衰退阶段的

表 037－1　　大洋盆地的生命周期及演化阶段

阶段（期）	实例	主导运动	特征形态	沉积物	火成岩	变质作用
胚胎期（Ⅰ）	东非大裂谷	抬升	断块隆起（裂谷）	很少	拉斑玄武岩溢流，碱性玄武岩中心	甚轻
幼年期（Ⅱ）	红海亚丁湾	扩张	断块隆起（狭窄海洋）	陆棚沉积蒸发岩	拉斑玄武岩洋底，碱性玄武岩岛屿	甚轻
壮年期（Ⅲ）	大西洋	扩张	洋中脊	陆架沉积物	拉斑玄武岩洋底，碱性玄武岩岛屿	轻
衰老期（Ⅳ）	太平洋	收缩	岛屿－海沟	岛弧沉积物	安山岩，大陆边缘为安山岩及花岗闪长岩	局部规模大
终结期（Ⅴ）	地中海	收缩与抬升	年轻山脉	蒸发岩、红层碎屑岩、岩楔	安山岩，大陆边缘为安山岩及花岗闪长岩	局部规模大
残痕期（Ⅵ）	喜马拉雅山（地缝合线）	收缩与抬升	年轻山脉	红层	很少	大规模

三个期是衰老期（Ⅳ）→终结期（Ⅴ）→残痕期（Ⅵ）。胚胎期的典型代表是东非（大）裂谷，虽然它还没有生成洋壳，但已日

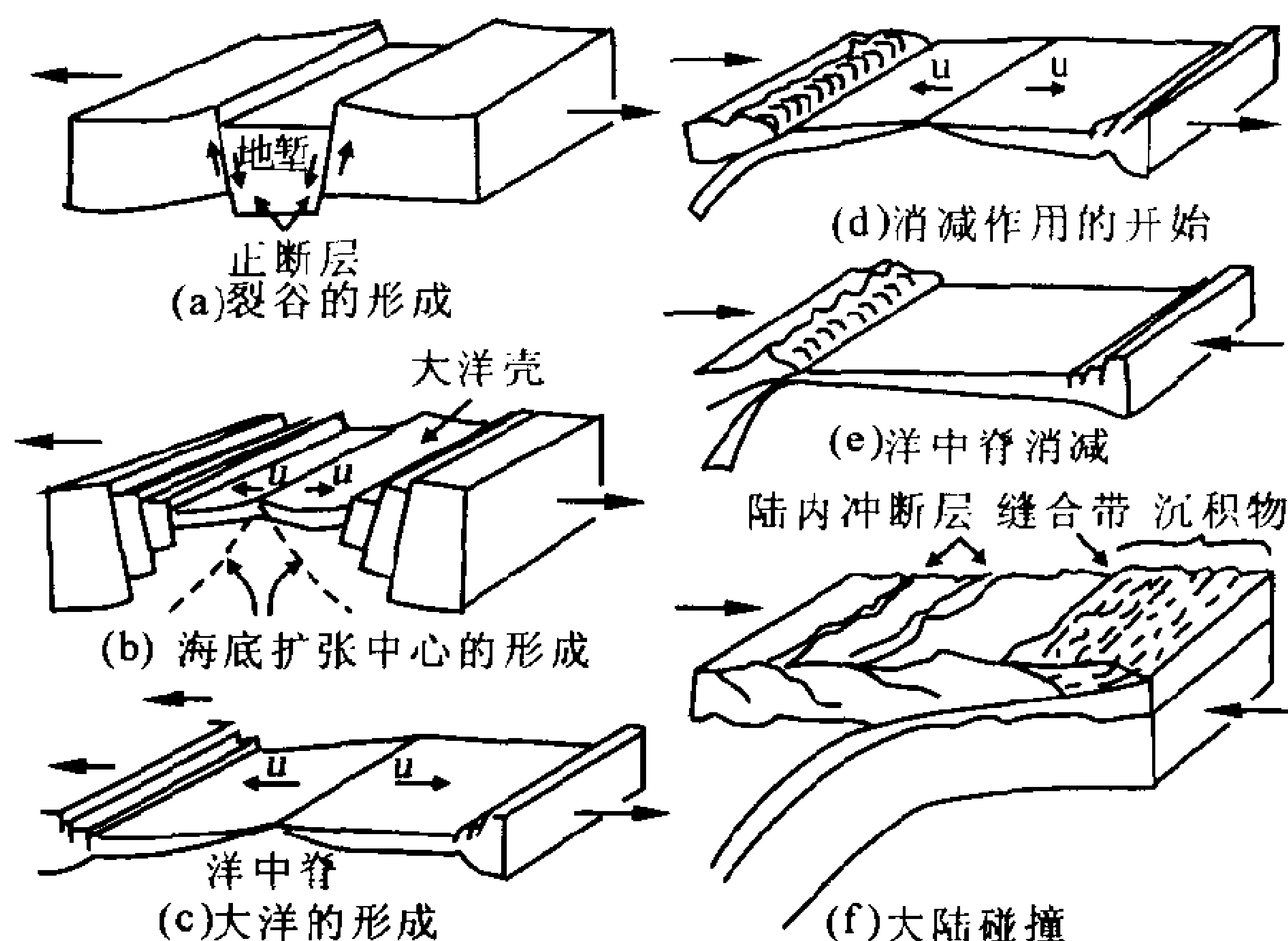


图 037－1　威尔逊旋回示意图

渐张开，裂谷的中心块体（地堑）已沉降下去〔图 037－1（a)〕。幼年期的代表是红海[①]〔图 037－1（b)〕、亚丁湾以及加利福尼亚湾。深海钻探23B航次证实，近240万a以来，红海海盆以 0.9cm/a 的速率在扩张，为狭窄的年轻洋盆，已出现新生洋壳。加利福尼亚湾内的轴部盆地也是经过近 400 万 a 的海底扩张形成的。挪威海、巴芬湾也是幼年期的早期实例。壮年期的典型代表是大西洋〔图 037－1（c)〕，它在侏罗—白垩纪时代开始张开，发育至今已十分成熟，具有现代大洋的一切特征，中部为大西洋中脊，中脊轴部有裂谷，裂谷内不断溢出枕状和绳状拉斑玄武岩。印度洋和南大洋也是壮年期的例子〔图 037－1（d)〕，但它的东北角已开始消减于爪哇海沟之下了。衰老期的典型代表是太平洋，它被视为泛大洋的残余，虽然太平洋至今仍然是最大的大洋，但与它在二叠—三叠纪时所覆盖的除泛大陆以外的整个地球

① 美国"双子星"号宇宙飞船测量，红海扩张速度达 2cm/a。

表面相比已小得多了，它现在正处于衰退阶段〔图037－1（e）〕。终结期的代表是地中海，它被视为古特提斯海的残余海盆，至少在中新世时曾干枯过，在距今约500万a时，因直布罗陀海峡被冲破，大西洋海水复又注入才形成今日的地中海。黑海和里海也是终结期的例子。残痕期的典型代表是喜马拉雅山，印度河—雅鲁藏布江构造线便是大洋封闭后留下的疤痕——地缝合线，是洋脊消减之后大陆碰撞的结果〔图037－1（f）〕。可见大洋的发展过程呈出现张开（分裂）—闭合（联合）—再张开—再闭合（反复循环）的旋回演化模式。所谓旋回即大洋发展的阶段性和周期性。由于这一旋回（循环）模式首先被J.T.威尔逊（1973）所认识，地球科学界将这一旋回模式称为威尔逊旋回。现已有地质证据证明，这一旋回曾在大西洋分裂处出现过，也就是说，在那里有一个先前的“原大西洋”。图037－2所展示的就是扩张着的

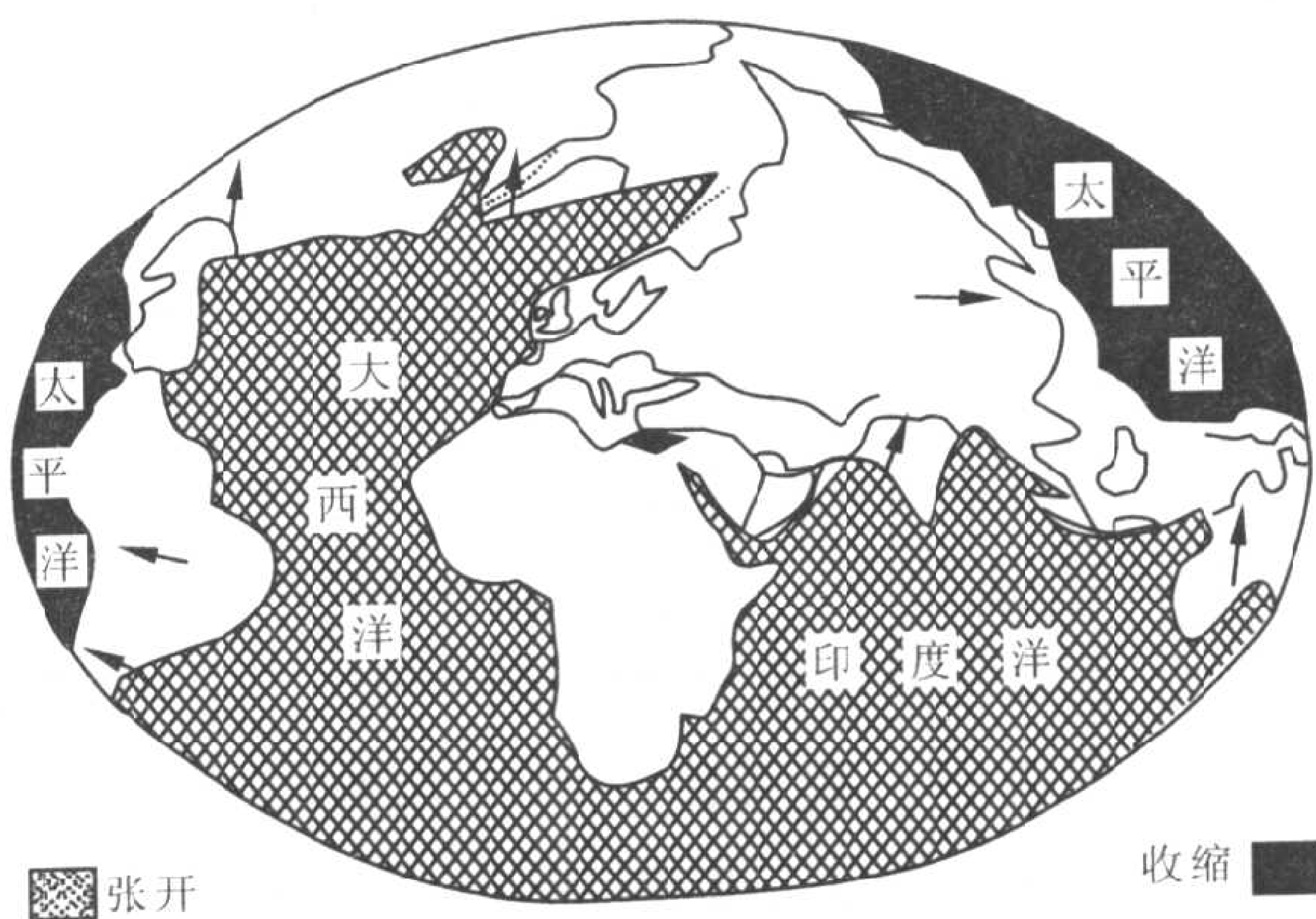


图037－2　扩张着的大西洋（印度洋）
和收缩着的太平洋

原大西洋（大西洋）和印度洋正在向太平洋方向的推移，而太平洋及其周边诸大陆的漂移收缩则是指向太平洋内部的。按大陆相对于漂移方向的比较，则美洲大陆的前缘（西缘）是陡峭的太平

洋型大陆边缘，后缘（东缘）是宽缓的大西洋型大陆边缘。随着美洲大陆向西漂移，其前缘仰冲逆掩于太平洋洋底之上（中南美洲），太平洋（前方）趋于收缩，大西洋（后方）逐渐张开。可见大陆漂移与大洋的开合是相辅相成的。可以说地球表面就是由漂移着的大陆和张开及闭合着的大洋所组成的。这也是岩石圈板块生长、漂移和俯冲作用的必然结果。

138 地球的积木式结构：板块构造

板块构造是由美国拉蒙特地质观测站的访问学者勒皮雄（X.Le Pichon）、普林斯顿大学的摩根（W.J.Morgan）、英国剑桥大学的麦肯齐（D.P.Mckenzie）等青年学者共同提出来的新全球构造理论。这一理论虽创立于20世纪60年代末，但却经历了长达56年（1912～1968）的历程。它发端于魏格纳的大陆漂移说（1912），奠基于赫斯和迪茨的海底扩张说（1962）、瓦因和马修斯模型（1963）以及威尔逊的转换断层新概念（1965）。很明显，板块构造实际上即上述理论的引申、发展和综合。

板块的概念最早是由威尔逊在创立转换断层时提出的。威尔逊指出，连绵不绝的活动带网络将地球表层划分为若干刚性板块。所谓刚性板块即地球表层大小不一的球面盖板，盖板的表面即地球的固体表层（刚性）。由于地球表面是曲面，因而球面盖板或板块是弯曲的，单个球面盖板的面积较大，多为 10^7～$10^8 km^2$，但厚度较小，尽管也在几十千米至200km之间，但相对于相同板块的横向尺度及6370km的地球半径仍然是一块薄板，故称为板块，全称是岩石圈板块。板块构造是地球表面岩石圈板块破裂成若干块体，彼此之间相互作用、相互移动所形成的构造，也就是一般所说的新活动构造。其实，所谓板块构造的板块也并不是整板一块，大洋板块往往为成组断裂带所切割。这些成组出现、近于平行的断裂带常把大洋板块切割成几千千米长、几

百千米宽的板条。板条是大洋板块的一种基本构造形态。当板条构造在俯冲带插入地幔后，称板舌构造。板舌下插深度可达600~700km。大陆岩石圈碰撞带也有板舌构造，但下插深度较浅，一般在200km左右。此外，大陆板块与大洋板块相比，虽然大陆板块没有大洋板块的板条构造发育，但大陆板块具有比大洋板块复杂得多的多层结构——多层滑脱构造和多层剪切构造。

现代地球板块的轮廓，最早是由勒皮雄（1968）勾画的。他把全球岩石圈划分为6大板块，并计算了各个板块的旋转中心和转动率，他所划分的6大板块是：太平洋板块、欧亚板块、非洲板块、美洲板块、印（印度）澳板块和南极（洲）板块。之后学者们又将美洲板块分解为北美和南美板块，印澳板块分解为印度（洋）和澳洲板块，这样全球又有了7大（或8大）板块之分了。8大板块也还有另外的划法，它们是非洲板块、欧亚板块、北美板块、南美板块、南极洲板块、印度—澳大利亚板块、南太平洋板块和北太平洋板块（M.Mattauer，1980）。在8大板块之间，还镶嵌着14个中小板块（陈远泰，1997），它们是阿拉伯板块、婆罗洲板块、加勒比板块、加罗林板块、科科斯（可可）板块、印度支那板块、戈达板块、华北板块、纳兹卡板块、鄂霍次克板块、菲律宾（海）板块、斯科舍板块、索马里板块和扬子板块。目前在地学界比较流行的是12板块方案（图038-1），以大陆板块为主,涉及少部分海洋板块（板块划分并不遵循海陆界线）的是：欧亚板块、北美板块、南美板块、非洲板块、阿拉伯板块及南极（洲）板块；以海洋为主的板块有太平洋板块、菲律宾板块、印度—澳洲板块、加勒比板块，以及东太平洋地区的纳斯卡（Nazca）板块和可可斯（Cocos）板块。

全球12大（或8大）板块为一级板块，以此更进一步的划分为中小板块，板块面积为10^5~10^6km^2或更小。中小板块的作用虽不及大板块为大，但对于相邻板块的运动还是相当显著的，

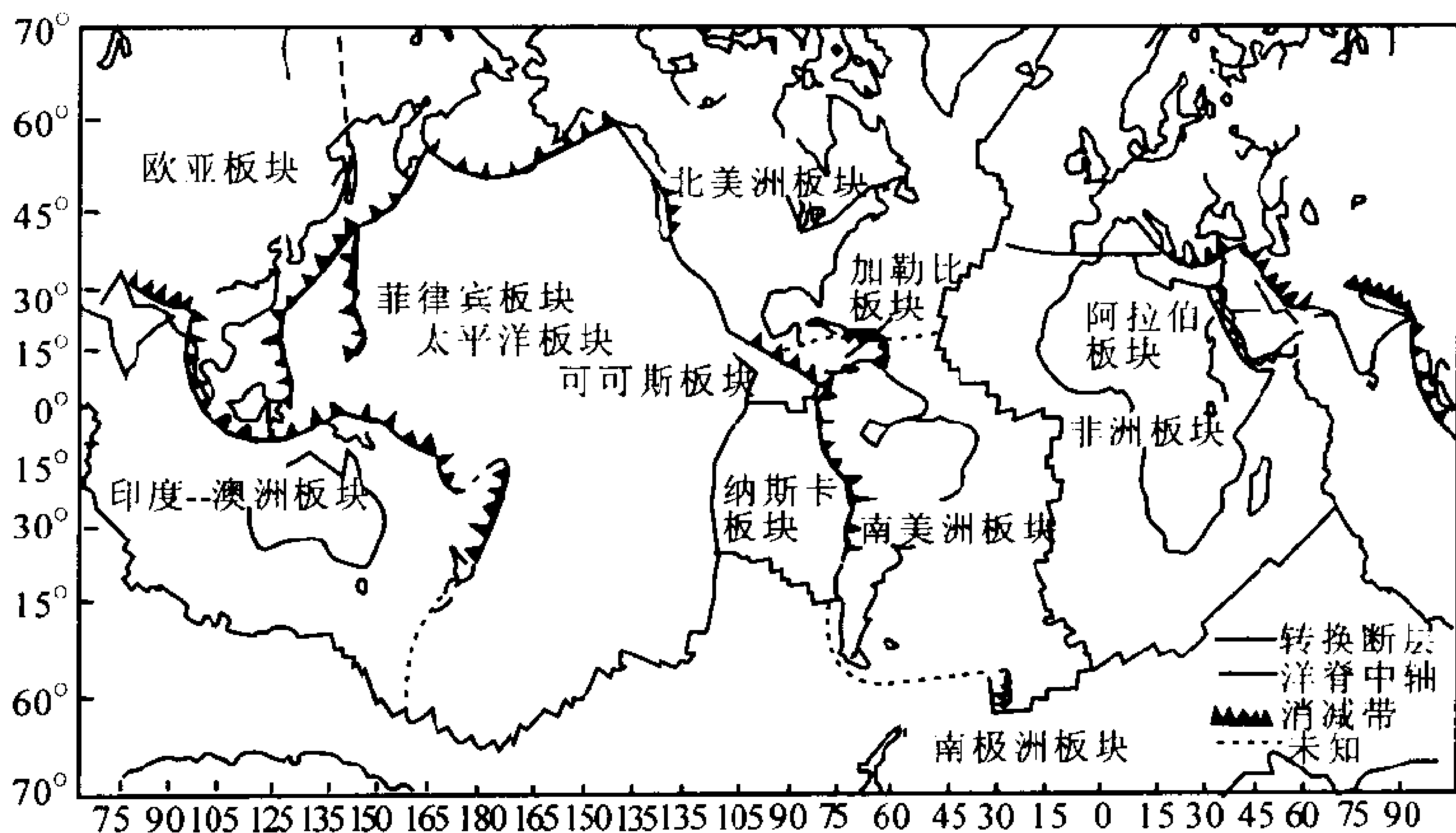


图 038 - 1　全球 12 大板块分布图

它们在全球板块运动中仍具有不可忽视的作用。

板块构造这个革命性的理论从根本上否定了传统地质学的陈旧观念，提出大陆在水平方向上的大规模迁移运动，这对于地球科学乃至整个科学界的震撼是极为强烈的。1967 年，威尔逊在题为"地球科学的革命"中写道："如果漂移确实以相当快的速度进行着，那么我们的许多教授必然变得毫无意义。难道不正是我们改变的时候了吗?"

139 板块构造的基本单元

板块构造的基本单元是组成板块的一部分或是板块构造的关键地域（傅容珊等，2001），计有岩石圈、洋中脊系统、消减带、转换断层、大陆碰撞带、三联点、热点和地幔柱，其中岩石圈、洋中脊系统、转换断层等在此之前均有详细论述，现主要就板块构造基本单元的其他关键性质予以补充说明。

岩石圈：是刚性的力学分层，平均厚度 100km 左右，大约占

地球半径的2%~4%。力学性质在水平方向上具有很强的刚性，但在岩石圈板块边界可呈现出流变性质；在垂直方向上，在冰川加载和卸载时间尺度内，可呈现出弹性或粘弹性性质。

洋中脊系统：洋中脊附近地形高度是距离其中心的函数。因此洋中脊高差提供了一个可能的板块驱动力源。洋中脊也是全球火山系统的一部分，它是在地幔岩石上升过程中，由于压力释放所造成的部分熔融而形成的。熔融物质在上升填充由海底扩张而形成空隙的同时，又推动了岩石圈板块向大洋中脊的两侧运动，这一模型称之为压力释放部分熔融模型。部分熔融的地幔称耗散地幔，其厚度取决于部分熔融的程度。如果将20%玄武岩的熔化定义为部分熔融，则计算表明，与此相对应的耗散地幔厚度约25km。

转换断层：是板块边界的一种特殊形式，可连接一个海沟的两段或者连接海沟和洋脊等。

消减带：是板块汇聚、消亡的地带。实验表明，在绝热条件下，消减带下冲板片由于压力增加，其密度和温度也将随之增高，然而当下冲板片的绝热自压温度梯度小于周围地幔的自然温度梯度时，下冲板片的密度仍然大于周围地幔的密度而产生一重力负浮力，此负浮力仍可导致下冲板片继续下沉，直到与周围温度达到平衡为止，这种导致下冲（俯冲）板片向下运动的力称为板片拉力，板片拉力可能也是板块运动的驱动力之一。

大陆碰撞带：属板块汇聚边界。碰撞的直接结果是造山运动。我国青藏高原和喜马拉雅山系是印度板块和欧亚板块碰撞的直接结果，而阿尔卑斯山系则是非洲板块和欧亚板块碰撞的直接结果。

三联点：也称三联结合点，是三个板块或三条板块边界的交会点或交汇的小区域。三个板块边界汇聚在一起形成三联构造。例如太平洋、可可斯和纳斯卡板块汇聚于2°11′N、102°10′W，是

三个洋脊的汇聚点；非洲、索马里和阿拉伯板块汇聚于阿法尔三角地区（图 039 - 1）。在地球表面上三联点常见，但“四联点”或四个以上板块的汇聚点却很少，即使出现了“四联点”也会很快演变成三联点或两个板块的一种边界，因此可以说三联点是球面上板块边界终止的惟一可能方式。

三联点可以是稳定的，也可以是不稳定的，这取决于它们在演化中能否保持着三条板块边界所构建的几何图形的稳定性。

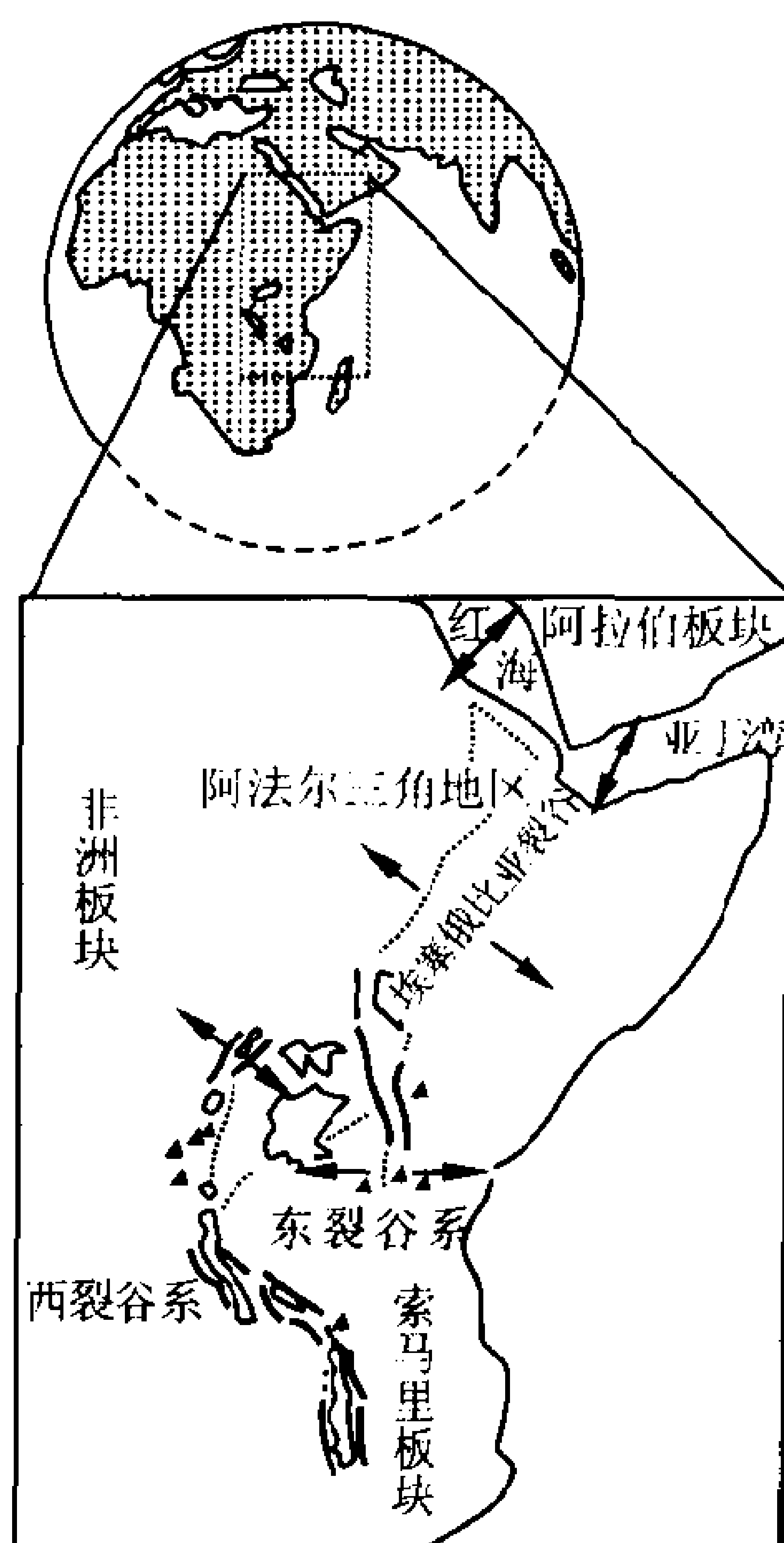


图 039 - 1　阿尔法三角地区三联点联系图

热点和地幔柱：热点和地幔柱（或地幔涌流）的概念是联系在一起的。从软流圈或深部地幔涌起，并穿透岩石圈的一股固定物质热塑性流，呈圆柱状者称地幔柱（热柱），呈羽缕状者称地幔羽（热羽），地幔柱在洋底或地表出露时即为热点。热点表现为地球表面的若干热流异常区，这些热流异常区通常局限在直径约为 100km 的范围内，目前已知全球热点有 100 多处。一般认为，地幔柱—热点位置是固定的，而板块运动则是持续不断地进行着的，当板块跨越呈周期性喷射岩浆的热点时，岩浆穿过板块在表面形成火山（图 039 - 2）。由于板块一直向前运行，如同纸带在穿孔机出口处运行打出一系列孔洞一样，所呈周期性喷射岩浆的热点就形成了间隔较为规则的串珠状火山岛链，这些火山岛链就是岩石圈板块漂移过热点的轨迹，是板块运动的速度和方向的表现。由于热点和地幔柱源于很深的地幔，并不随板块



运动而移动，所以它们有可能作为一组参考系去确定板块的绝对运动。

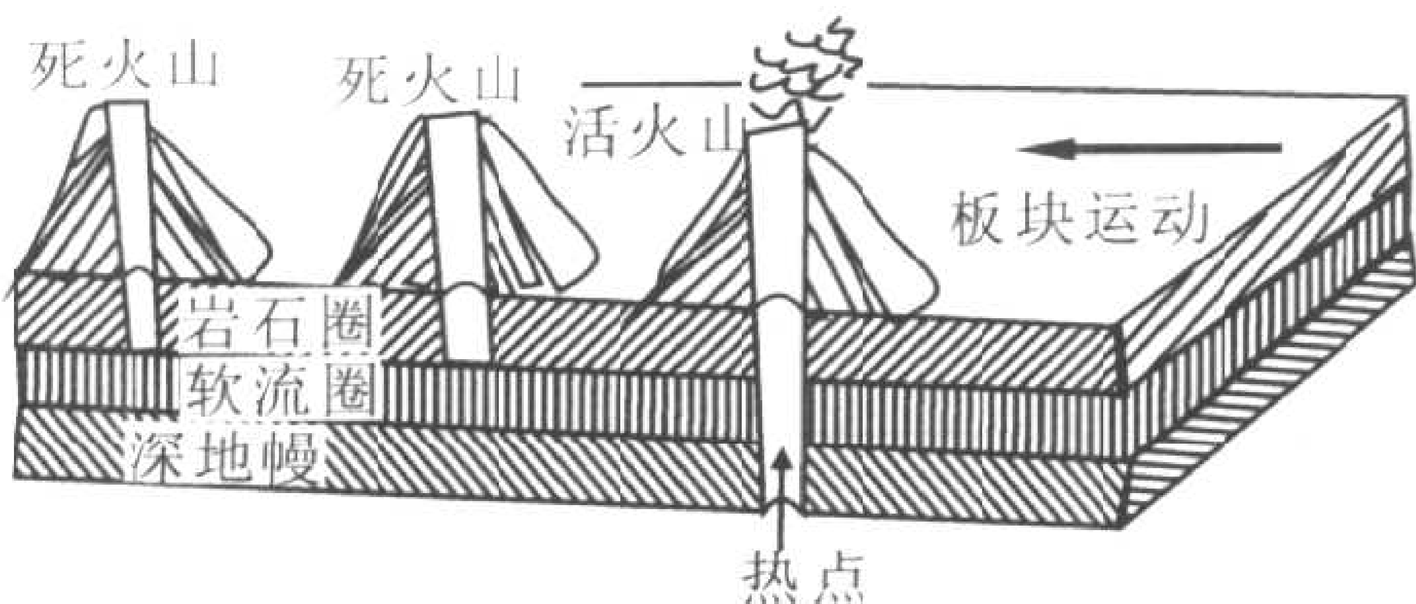


图 039－2　热点和火山链形成示意图

近年来日本学者丸山茂德（1994）通过地震层析成像技术得到整个地幔内部结构图像。图像显示岩石圈下插板块可一直沉降到 670km 深的上下地幔边界，下插板块滞留于这个边界之上，并被软化、流动，当滞留板块累积到一个临界量之后，就会塌落到下地幔。为了填补因塌落而形成的“空间”，促进了下地幔底部产生向上运动的热地幔柱。因此滞留板块塌落与热地幔柱上升必然成对出现，并把塌落板块柱称为“冷幔柱”，上升地幔物质称为“热幔柱”（图 039－3）。丸山茂德认为，现

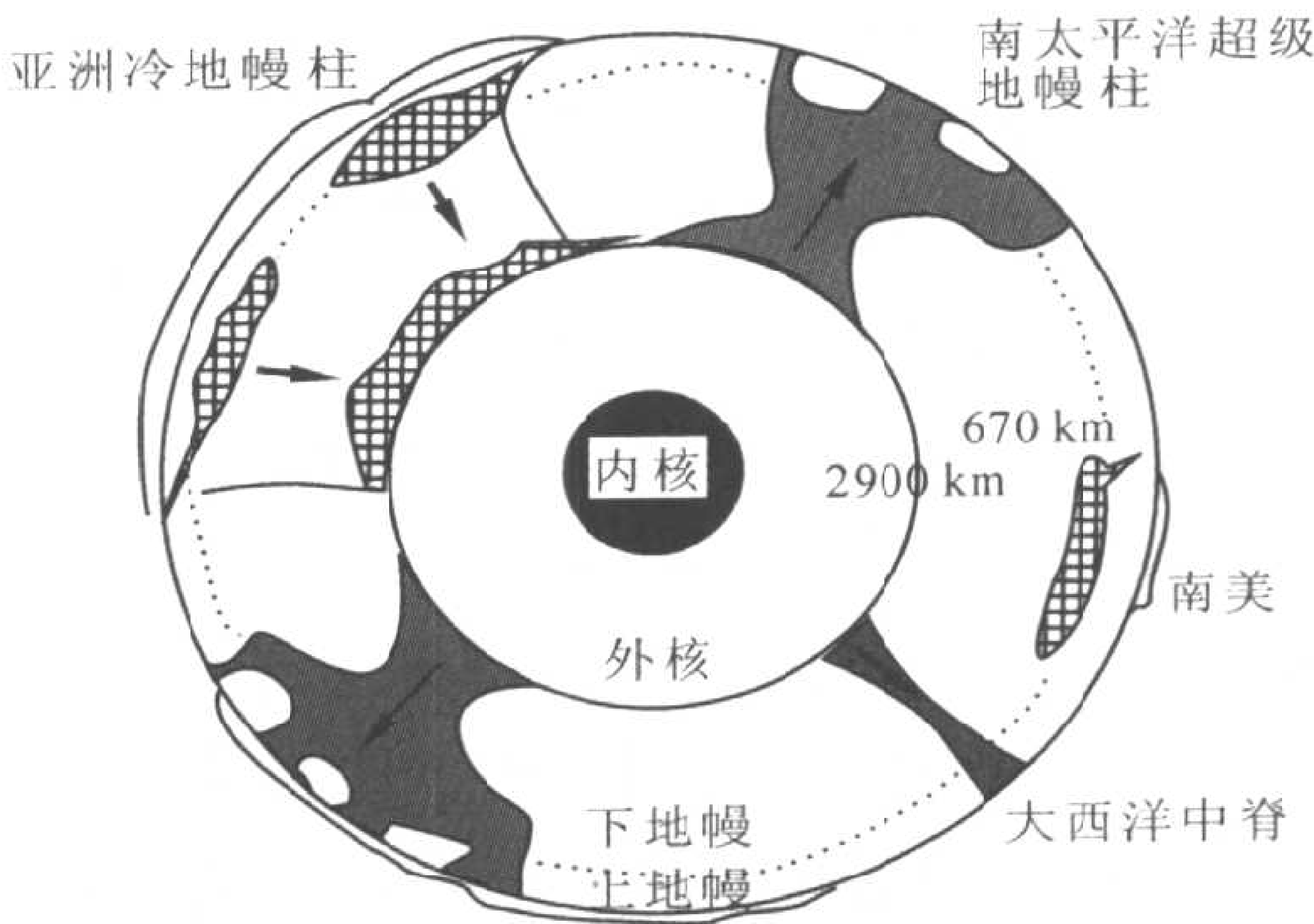


图 039－3　全球超地幔柱模型

（S. Maruyama，1994）

代地球是由亚洲大陆之下的下降超级冷幔柱及位于南太平洋和南非之下的两个上升超级热幔柱所制约的。因此学者们提出地幔中



可能存在不同深度层次和不同规模的热流现象。传统线状地幔对流诱发的板块构造运动仍然存在，但超出原有板块构造模式的巨型“热地幔柱”和“冷地幔柱”也是地球演化中的重大因素，在地球演化的整体事件中可能起着更为关键的作用。

040 板块边界及其演化

既然板块是地球表面被活动带网络所分隔的一块一块的球面盖板，那么不言而喻，板块是有边界的，板块边界即两个板块之间的接触地带。板块边界是构造活动带，依据板块的相对运动状态，可区分为三种基本类型（图 040－1）和 7 种演化形式（表 040－1）。震源机制表明，表 040－1 中的三类边界的主导应力分别是拉张、挤压和剪切。

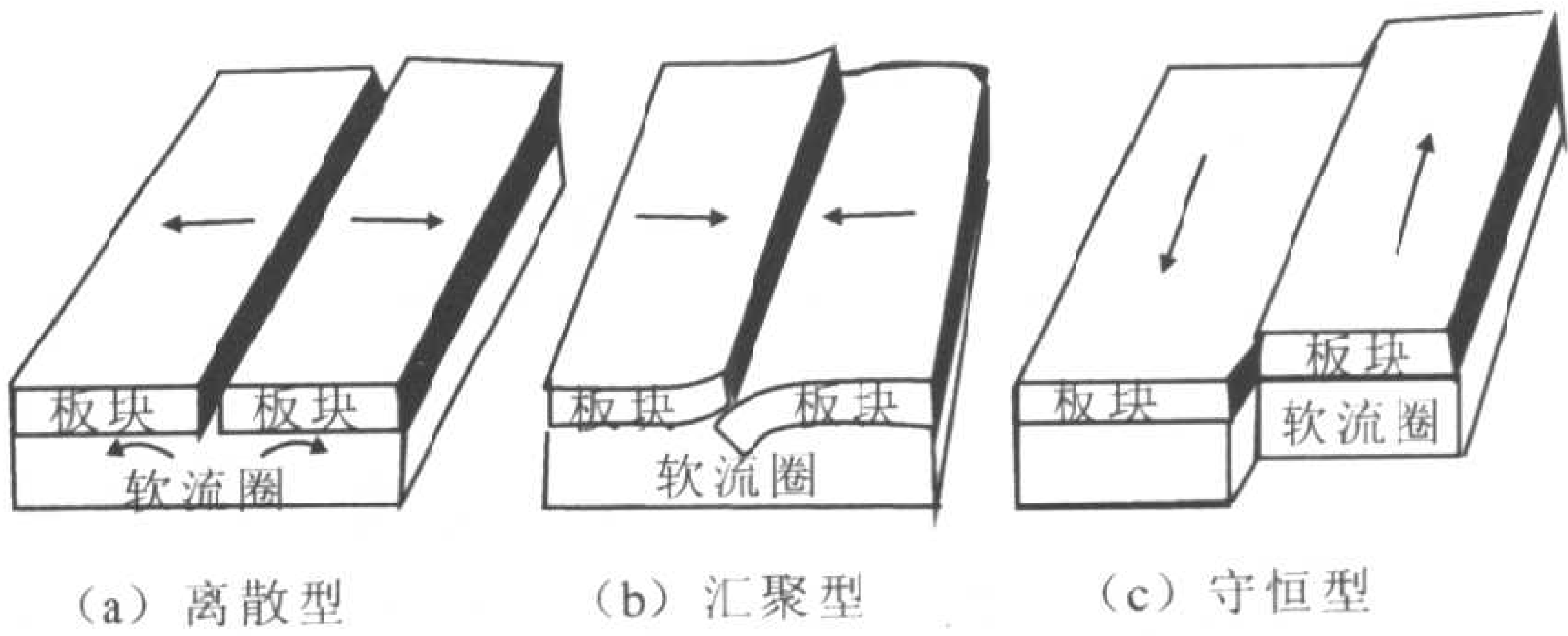


图 040－1　板块边界的三种类型

1. 离散型边界：即分离型边界，也称生长边界、增生边界，指两个相互分离的板块间的边界，伴随洋壳新生和海底扩张。特点是两板块做背离运动，向两侧分离、散开，由于它的应力状态是拉张，故又称拉张型板块边界。正因为应力拉张，所以边界线常呈锯齿状。离散边界既可发生于大洋岩石圈，也可发生于大陆岩石圈。发生于大洋岩石圈者见于大洋中脊轴部及轴间裂谷带，如大西洋中脊、东太平洋中脊等。由于洋脊拉开，地幔物质上涌，形成新的洋底。新洋底对称地添加到两侧板块边界的后缘，致使洋底岩石圈在大洋中脊轴部不断增生。发生于大陆岩石圈者

称大陆裂谷带，如东非裂谷带。大陆裂谷带使统一的大陆岩石圈板块分离、散开，进而演变为大洋裂谷带。

表040-1　　板块边界基本类型表

类型	演化形式	板块地壳性质	岩石圈演化	板块运动方向	应力状态
离散型（分离型）	大洋裂谷	洋壳—洋壳	大洋岩石圈生成	垂直板块边界的背离运动	拉张（引张）
	大陆裂谷	陆壳—陆壳	大陆岩石圈分裂		
汇聚型	洋内弧沟系 陆缘弧沟系 陆间海 地缝合线	洋壳—洋壳 陆壳—洋壳 陆壳—陆壳 陆壳—陆壳	大洋岩石圈消亡，大陆岩石圈生长	垂直板块边界的相间运动	挤压
守恒型（转换型）	转换断层	陆壳或洋壳	不生长 不消亡	平行板块边界的走滑运动	剪切

2. 汇聚型边界：也称消亡边界，指两个相互汇聚板块之间的边界。相当于海沟和活动造山带，所伴随的是洋壳消亡和大陆碰撞。由于汇聚应力是挤压的，故又称挤压型边界。鉴于地球表面积基本不变，因而离散型边界岩石圈的增生必然为某些地方岩石圈的破坏所补偿。岩石圈的破坏或压缩就发生在汇聚型边界。汇聚型边界有两个亚型，俯冲边界和碰撞边界。（1）俯冲边界，由于大洋板块较之大陆板块往往具有密度大、厚度小、位置低的特点，故大洋板块一般总是俯冲于大陆板块之下。也有较大大洋板块俯冲于另一较小大洋板块之下的俯冲边界，如沿马里亚纳海沟的俯冲边界。俯冲边界主要分布于太平洋周缘，包括东亚型和安第斯型大陆边缘，前者海沟有边缘海与大陆相隔，后者海沟直接濒临大陆。海沟附近通常出现浅源地震，向陆侧依次出现中

源、深源地震，构成一倾斜的震源带，即贝尼奥夫带。贝尼奥夫带具有很高的 Q 值（介质品质因素，与地震波衰减程度成反比），接近于岩石圈。它的倾角变化于 15°～90°之间，太平洋东岸倾角不超过 30°，西岸则平均为 45°，从而表明，岩石圈板块是沿贝尼奥夫带向下俯冲的。在俯冲过程中，大洋板块上覆沉积物可能随板块俯冲潜入地下，部分沉积物也可能被刮落下来添加于海沟侧坡，构成增生楔。增生的混杂岩体逐渐成长并受挤压而隆起，组成非火山弧，这在一定程度上导致大陆增长。当板块俯冲至一二百千米深处时，摩擦增大，温度升高，导致下插板块或上覆地幔物质产生部分熔融，从而有岩浆上升并喷出地表，形成与海沟平行延伸的火山弧，从而构成前述的岛弧—海沟系。（2）碰撞边界：也称地缝合线边界，是大洋板块俯冲殆尽，两侧大陆相遇会合开始碰撞时的边界，表现为活动造山带。在汇聚碰撞过程中，原大陆边缘和洋底沉积物遭受紧密褶皱和逆冲推覆，一系列地壳楔沿近水平的层间滑脱面（多为岩石圈内部低速带）拆离开来，相互冲掩叠覆，导致地壳压缩增厚，地面大幅度抬升，形成宏伟的褶皱山系，喜马拉雅山便是始新世以来板块碰撞边界的典型实例。20 世纪 80 年代以来重力测量所表明的均衡正异常（$6\times10^{-4}\sim1.2\times10^{-3}m/s^2$），反映喜马拉雅碰撞造山带地壳均衡状态遭到破坏，来自印度板块向北的强烈推挤阻碍了该区地壳的均衡调整，使之目前仍处于隆升之中。

3. 守恒边界：也称平移剪切型边界，是互相剪切、滑动的两个板块之间的边界，其边界线即转换断层线，所以，也有人称转换边界。沿这种边界通常既没有板块的生长，也没有板块的消减，但伴有频繁的浅震活动，可发生构造形变和动力变质作用。

以上板块边界类型是基本的类型，也是板块运动方向与板块边界相垂直时的端元类型，实际上它们之间还有许多过渡类型（图 040－2）。这些过渡类型的边界性质都是两板块相对运动速

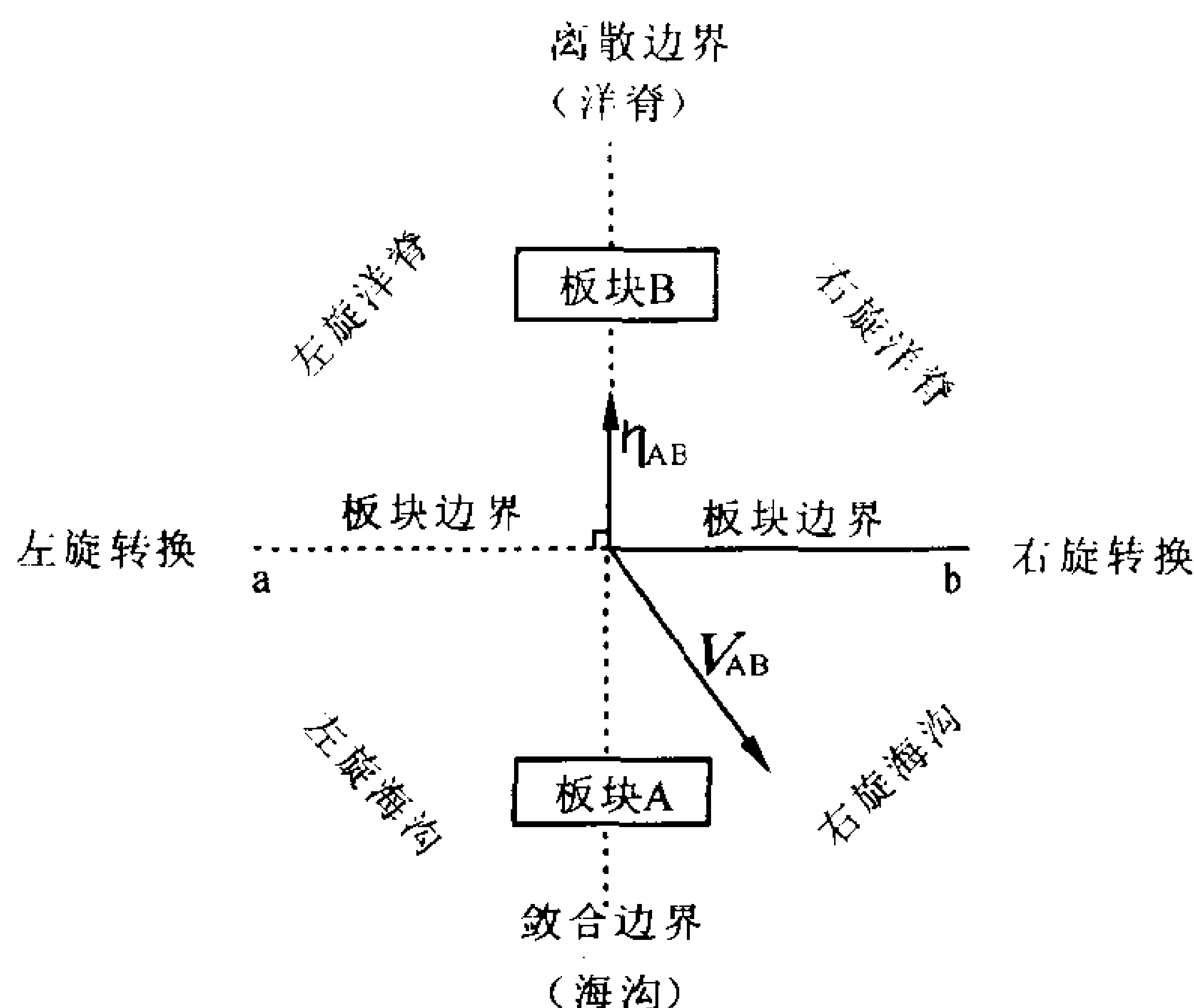


图 040-2　板块边界的可能过渡类型

ab 为板块边界；V_{AB}为板块 B 相对于板块 A（固定不变）的速度矢量；η_{AB}沿 AB 法线指向板块 B 的速度矢量随 V_{AB}与 η_{AB}夹角变化，板块边界性质也发生变化

度矢量及其与边界走向斜交时产生的。在斜向汇聚运动时，如板块边界类型是转换断层—海沟，则海沟可以是右旋或左旋；在斜向离散运动时，如板块边界类型是转换断层—洋脊，则洋脊可以是右旋或左旋。因此，板块边界类型并不是一成不变的，而是随着相对速度矢量与边界走向的几何关系，在时间上和空间上的变化而改变。例如，太平洋板块与北美板块的边界，在 3000 万 a 前是聚合边界，3000 万 a 后大部分转变为转换断层即守恒边界。又如弧形的阿留申海沟是太平洋板块与白令海板块的汇聚边界，由于边界走向的变化，使同一边界的不同地段在同一时间内有不同性质，东端基本上是汇聚的，西端基本上是守恒的，其间则为两者的过渡类型。

板块边界是可以迁移的。板块边界的迁移有两种形式，即渐变式或突变式，而经常发生的则是渐变式迁移。以非洲板块为

例，在非洲板块周围，南大西洋中脊和印度洋中脊在三面环绕着它，在这两条中脊之间没有可以导致岩石圈压缩破坏的汇聚型边界，相反，东非大裂谷又处于拉张状态，这意味着，在南大西洋中脊和印度洋中脊二者之中至少有一条中脊是渐变移动的。现假设南大西洋中脊不动，印度洋中脊迁移，这样不但非洲和印度洋中脊都将向东运动，而且印度洋中脊东移距离更大，而与之相对应的是南美板块西缘的海沟也将向西迁移。南极洲板块也如此。当冈瓦纳大陆破裂时，环绕南极洲板块的中脊是濒临南极海岸展布的，然而随着南极板块的不断扩大，南极洲周围中脊退离南极洲，并向北迁移。如此，则随着板块的渐变迁移，一些板块的面积（如南极洲板块）扩大了，而另一些板块的面积（如太平洋板块）则有所缩小。

板块边界的突变式迁移，表现为大洋中脊轴从一地跳迁到另一地，从而导致海底磁异常条带出现两套并列的对称系列。此外，大陆与大陆、大陆与岛弧相遇汇聚，即碰撞开始后，大规模俯冲作用停止，从而导致原俯冲带消失，并在其他地方形成新的俯冲边界或岛弧归并为大陆组成部分，形成新的造山带。

14 B 型俯冲与 A 型俯冲

所谓俯冲作用即洋壳向地幔的潜入过程，依潜入和被潜入板块的不同性质可区分为两种类型：B 型俯冲和 A 型俯冲。

B 型俯冲：即大洋板块向大陆板块之下的俯冲，也可以是大大洋板块向另一小大洋板块的俯冲（洋内俯冲）。由于洋陆俯冲总是沿贝尼奥夫带的俯冲，而贝尼奥夫带又总是与洋缘海沟相伴随，海沟又是大洋板块俯冲潜没的场所，故该类俯冲就以美国地质学家 H. Bemioff 姓氏的第一个字母“B”来命名。

典型的 B 型俯冲发育于太平洋东、西两岸，也见于印度洋东北缘的爪哇海沟，大西洋的波多黎各海沟和南桑德韦尔奇海

沟，以及地中海克里特岛南缘的海伦尼海沟（图041－1）。

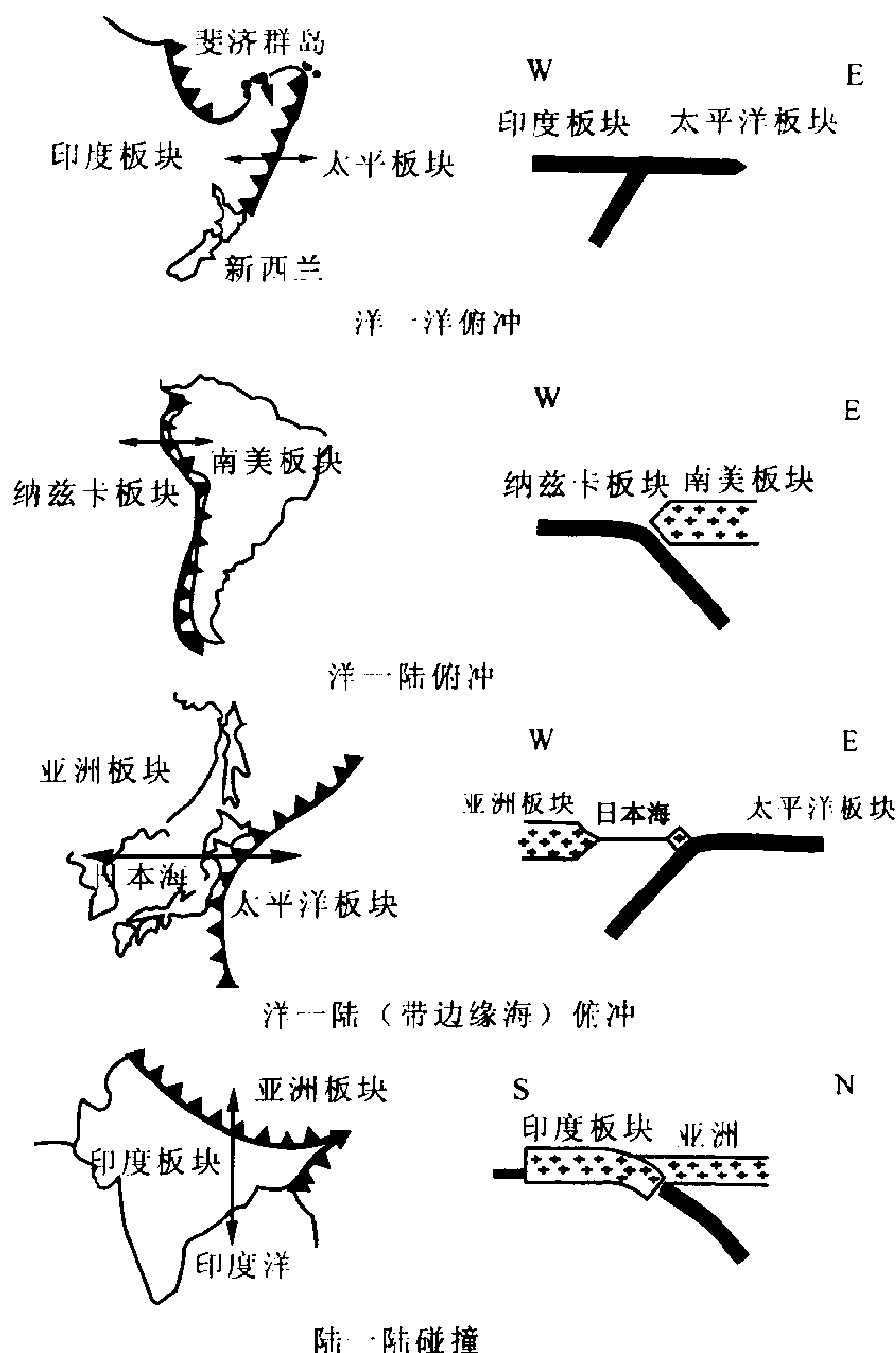


图041－1 B型俯冲的三种不同俯冲样式及A型陆－陆碰撞俯冲
（图中黑三角表示俯冲方向；N为北；S为南；E为东；W为西）

A型俯冲：是发生在大陆板块之间的俯冲，又称陆内俯冲或大陆俯冲、陆—陆俯冲。用字母A来命名，是为纪念阿尔卑斯山的著名研究家奥地利学者O.Ampferer（安普费若）之故，是他首先提出了阿尔卑斯大陆地壳曾遭受过俯冲潜没的假设。

从地球的内部结构看，A型俯冲主要是由于地壳与其上地幔分离而向旁侧的陆壳发生的俯冲，与强烈的挤压作用有关，因而常发育于造山带的前陆地区，即造山带与克拉通之间。基于此，一些学者认为印度板块现已俯冲到欧亚板块之下，形成了喜马拉雅式碰撞构造。该碰撞构造的动力学表现是，陆内缩短作用及大陆物质在印度板块俯冲端向东、西两侧的排出作用，从而造成大陆壳的双层重叠，使陆壳加厚形成高耸的山脉。

A型俯冲在我国大陆内部的表现则是扬子板块自南而北在华北板块之下的俯冲，特别是在我国大别—苏鲁地区，在晚三叠世已封闭的海洋板块（扬子板块）拖着大别—苏鲁地块在华北板块下部所构成的陆—陆俯冲（刘光忠等，1997），不只是形成了高耸的大别山，在苏鲁地块南、北两沿分别造成了逆、正断层，而且（也是更重要的）形成并折返露布于地表的大别—苏鲁超高压变质带（UHPM）。由于UHPM带的出露直接涉及地幔深处的动力学过程，所以我国正在该区（江苏东海）实施第一口大陆科学钻探工程，以检验UHPM带的形成和折返机制，并为地幔动力学过程提供资料和数据。

A型俯冲一般不造成火山活动，地震也多系浅源地震，但热流值很高。由于A型俯冲常形成多层板块状的逆冲推覆构造①，加厚了陆壳厚度，形成了高耸的山脉，表明：大陆岩石圈的内部堆叠、俯冲或消减所引起的水平缩短是内硅铝层造山的一个重要机制。

关于板块的俯冲角度（谢鸿森等，1997），主要是B型俯冲的俯冲角度，经对全球各大俯冲带的观测，俯冲角度在20°~90°

---

① 推覆构造：沿着倾角十分低缓的冲断层面，上盘岩块水平位移距离在数千米以上的构造。它造成了来自远处的外来岩块叠置在原地岩块之上，其运移距离可达几十至上百千米。

之间，但大多数在45°左右。常识告诉我们，如果除了重力之外没有其他力作用于俯冲板块之上，则俯冲板块的角度应在90°左右。这与观测结果显然不同，表明有其他作用力作用于俯冲板块的上部或下部，以便“托起”向下俯冲板块的俯冲角度。作为一个模型可以用地幔物质流动来讨论俯冲板块插入“可流动”的地幔中所产生的对流，以及它们作用于俯冲板块上的力及重力矩的平衡问题。以一定速度向下俯冲的板块可以延伸至无穷远，并将地幔分成两部分，即岛弧角和海洋角部分。D.L.Turcott等（1982）用二维流体模型讨论了这一问题。他们得出，在俯冲板块的俯冲角度为45°时，对于岛弧角一边作用于俯冲板块上的压力为：

$$P_D = -8.55\frac{\mu V}{r}$$

式中负号表示向上的吸引力。对于海洋角一边作用于俯冲板块下部的压力为：

$$P_H = +0.462\frac{\mu V}{r}$$

式中正号表示流体向上“托”起俯冲板块的力。由此可知，无论岛弧角一边作用于俯冲板块上表面的吸力，还是作用其下表面的托力都使其抗拒重力作用而保持一定的俯冲角度。同时还可以看出，作用于上表面的吸力比作用于下表面的托力要大一个数量级。

关于板块俯冲的最大深度，由横穿汤加海沟反演地震体波品质因数 Q 剖面可知，高 Q 值的俯冲板块（软流圈对应低 Q 值）可一直延伸到670km间断面附近。假定大洋扩张速率为5cm/a，而俯冲角度为45°左右，则在18～19Ma期间，板块即可俯冲到670km界面附近。



042 板块的运动

在讨论全球板块运动时，通常认为板块具有刚性，它有能力在很长距离内传送应力，其内部并不发生明显的塑性形变。同时还认为地球表面积保持不变，因为全球所有板块可能都在运动。这样就有可能用数学方法来描述板块运动了。

板块的相对运动：板块运动一般是指地球表面上一个板块对另一个板块的相对运动。以大西洋中脊为例，大西洋中脊两侧的欧亚（非洲）板块和北美（南美）板块 分离，但这并不能确定大西洋中脊相对于地理极是静 个板块中哪一个是静止不动的。我们只能假 然后去分析另一板块相对于它的运 相对于北美板块是向东运动，而北 动。相对运动的距离，在过去的 2 千千米，相对运动速率，根据现 年几个厘米的量级（图 042 - 1）

刚体板块沿地球表面的运 理。根据欧拉定理可以用一个 在地球表面的运动，其旋转 转轴与地球表面的交点称之 块 B 与板块 A 之间的相对

板块旋转运动由旋转 ϕ）和旋转角速度（ω）砂 为 $\vec{\Omega}$，则其边界上球（ 为：$\vec{v}=\vec{\Omega}\times\vec{\gamma}$，反之， 可反演两板块间相对

相邻板块及其边 过以下观测资料取

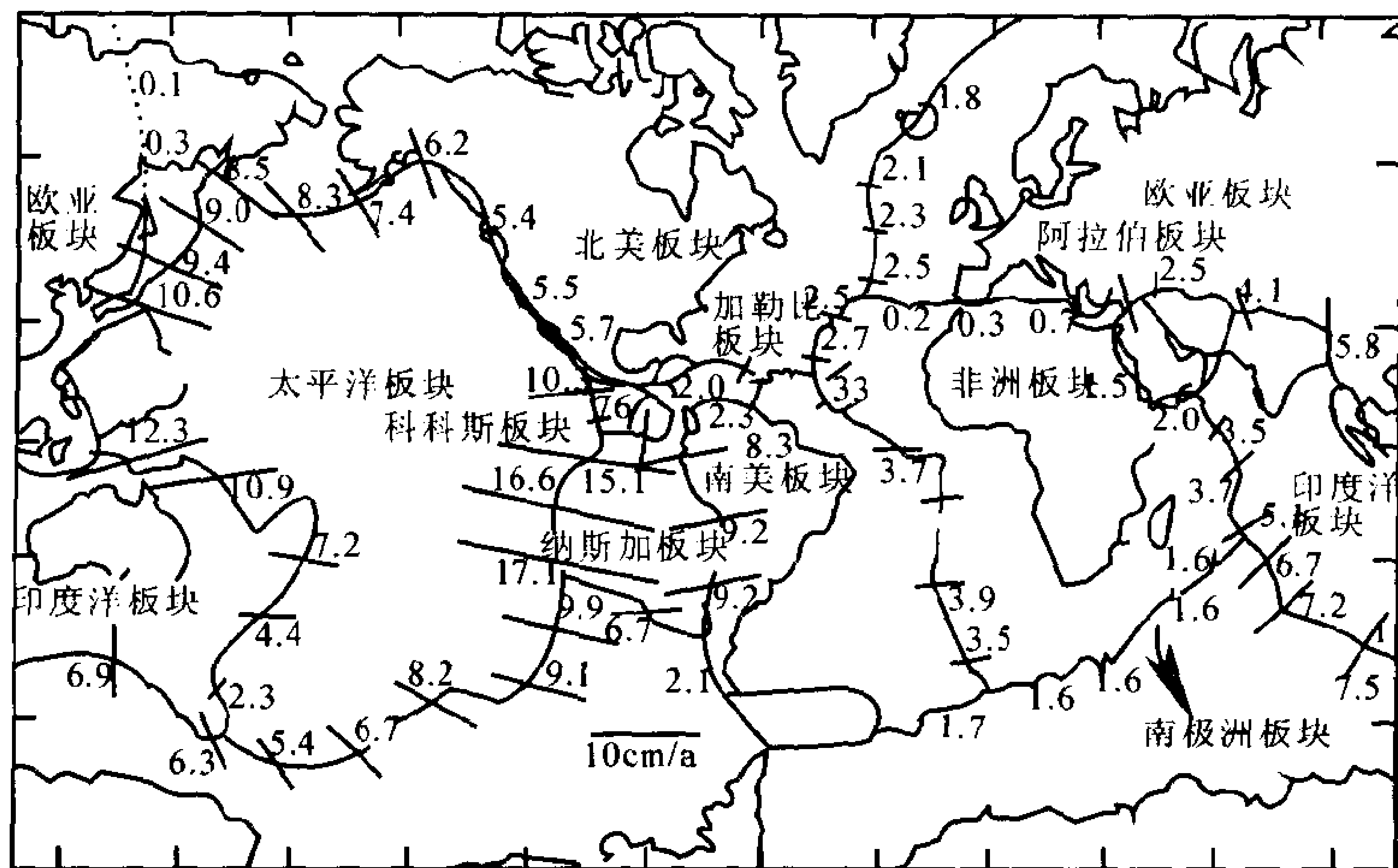


图042-1 现代板块相对运动速率图
（据叶叔华等，1997）

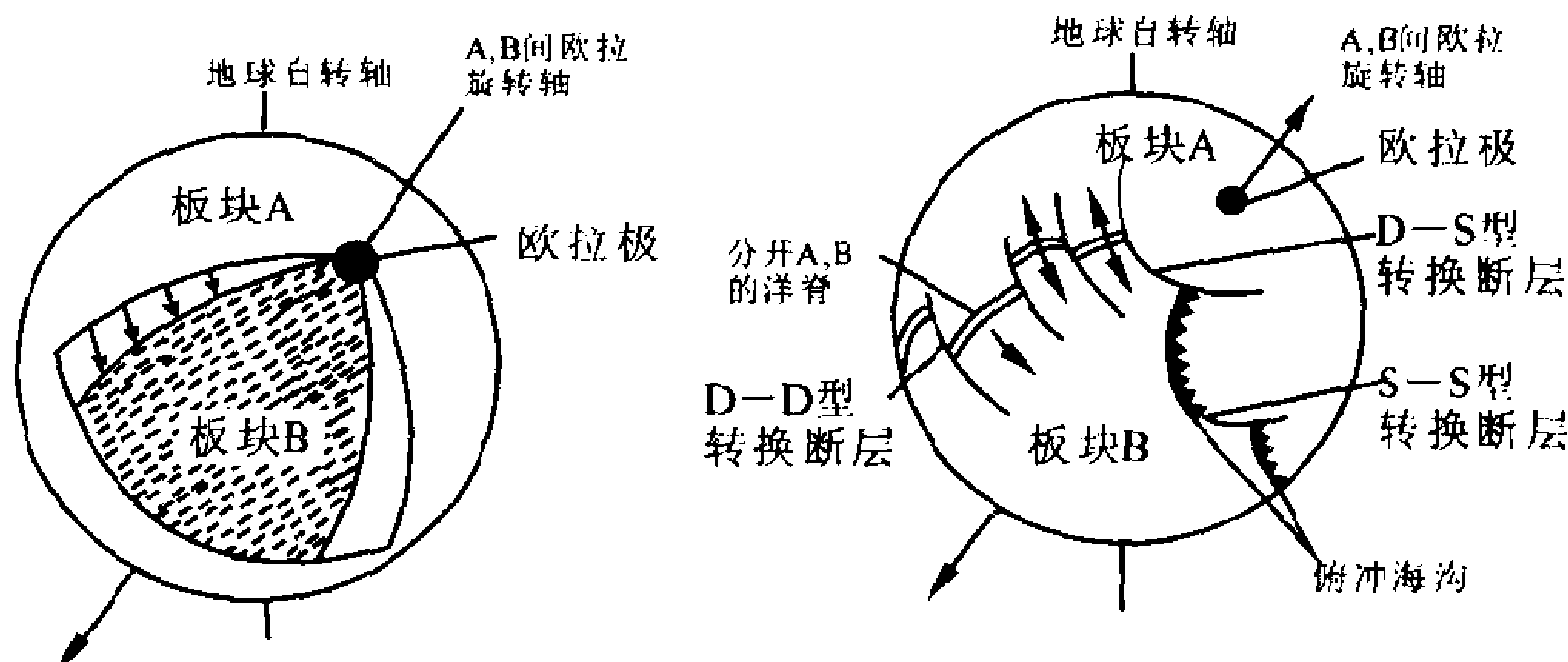


图042-2 板块旋转运动示意图
（阿莱格尔，1987）
（欧拉定理描述的刚性板块在球面上的相对运动）

得；2. 转换断层方位角，由海底地形调绘取得；3. 地震滑动矢量，通过对地震震源机制解的分析取得，而板块运动的旋转极则主要是通过对大洋中脊方位的测量、磁异常条带的走向以及转换

断层的垂直方位来确定。以转换断层为例，由于转换断层的走向平行于相邻板块之间的相对运动方向，也就是说，相邻板块在球面上的运动轨迹就是转换断层（图 042－3），故采用求转换断层垂线交点的方法，不难求出以转换断层为界的各对板块之间相对运动的旋转极（P）。

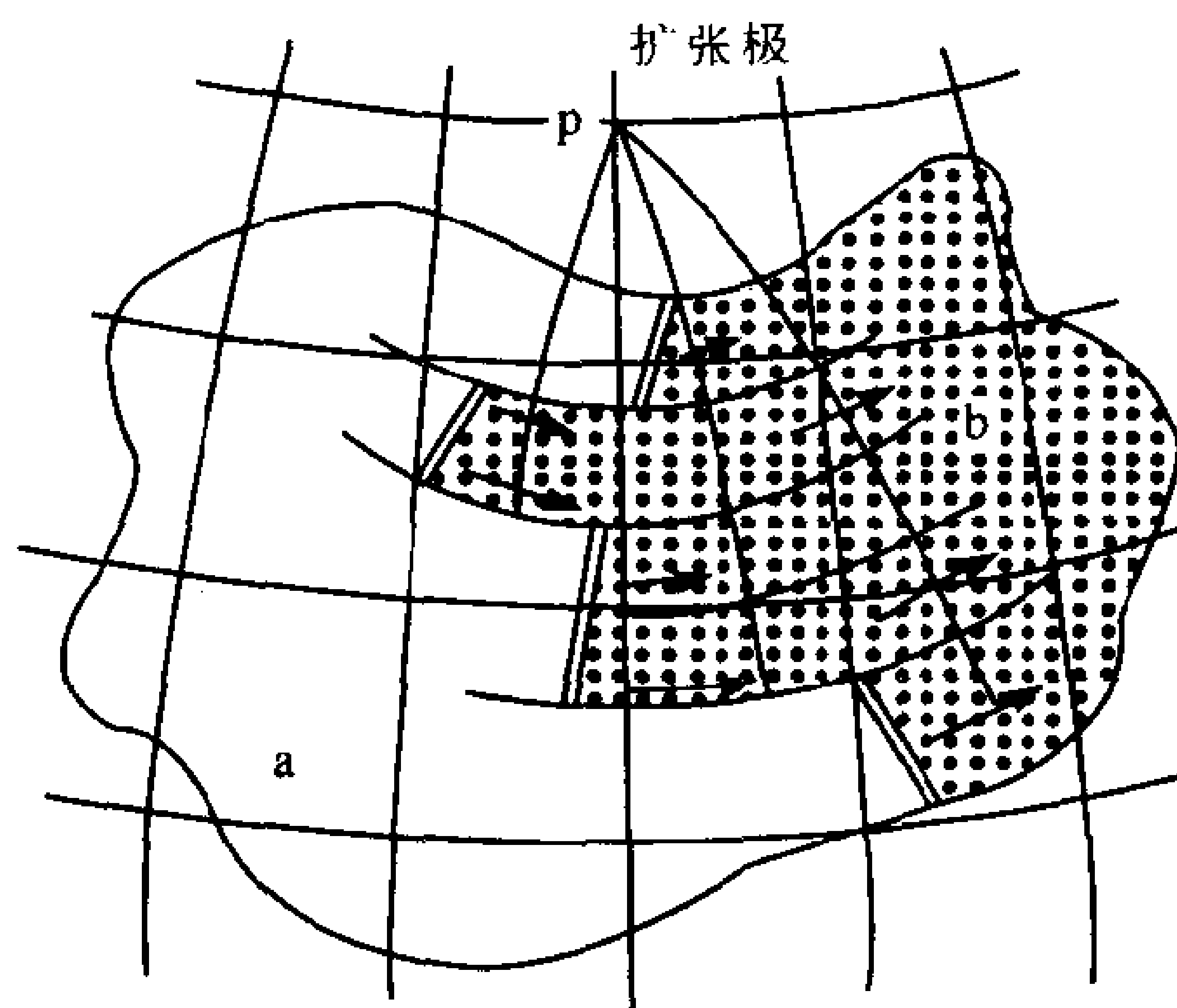


图 042－3　板块地球表面运动示意图

由于板块的刚性是近似的，故板块旋转运动的定量计算值不可能是实际值。不过利用现代空间技术观测到的板块间相对运动速率显示，板块运动方向和速率的地学估计与短时间尺度的直接测量结果大体上还是一致的。20 世纪 90 年代，C.DeMets 等使用来自 22 个板块边界的 277 个扩张率、121 个转换断层方位和 724 个地震位错矢量得出了描述板块相对运动的 NUVEL－1 模型（图 042－4）。该模型不仅提高了描述板块相对运动的精度，而且还发现了无论是汇聚或者是扩张均为斜交，同时还发现了一些边界区域的形变现象，如印度和澳大利亚板块之间可能存在一个形变边界。

板块的绝对运动：是指板块相对于深层地幔（地幔热点）的运动。相对于深层地幔平均位置固定的框架称为板块绝对运动参考架（参考系），这种参考架（框架）是通过热点或岩石圈的无整体旋转或称为平均岩石圈参考架来实现的。热点参考架的含义是，在地幔中存在一系列热点（应该是源自核幔边界的热点），一些学者认为，热点位置相对于地球自转轴和深层地幔是长期固定的，板块相对于热点的运动也就是板块的绝对运动，它可通过

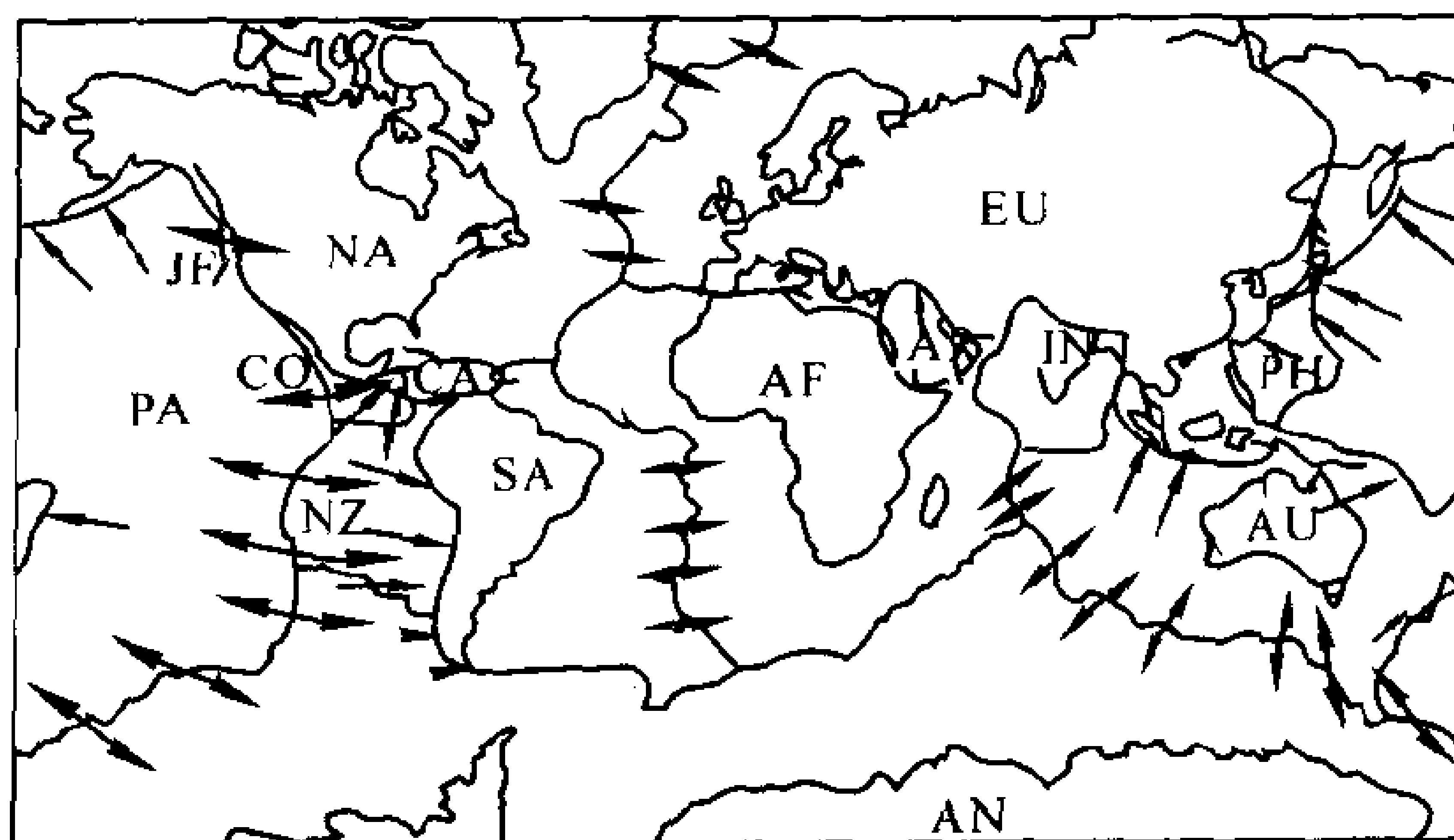


图042－4　板块相对运动NUVEL－1模型
（引自傅征祥，1997）

AF＝非洲板块；AN＝南极洲板块；AR＝阿拉伯板块；AU＝澳洲板块；CA＝加勒比板块；CO＝可可斯板块；EU＝欧亚板块；IN＝印度板块；JF＝胡安德富卡板块；NA＝北美板块；NZ＝纳兹卡板块；PA＝太平洋板块；PH＝菲律宾板块；SA＝南美板块

测量跨越热点火山链的年龄和长度得到。岩石圈无整体旋转参考架的含义是，如果岩石圈与软流圈的耦合侧向均匀，并且板块边界的力矩对称作用于两个相邻板块，则平均岩石圈参考架就是相对于深层地幔不动的参考架。板块相对于该框架的运动就是板块的绝对运动。在大多数板块上两种参考架标定的绝对运动基本一致，但也有一定的差别，这主要是平均岩石圈参考架相对于热点参考架有整体向西漂移的缘由所致。使用热点参考架得到的HS2－NUVEL－1模型如图042－5。以平均岩石圈参考架由NUVEL－1模型所导出的板块绝对运动模型（NNR－NUVELl）从略。

除上述参考架外，也有学者以西太平洋岛弧系作为参照系，计算了1000万a以来全球各主要板块以及一些热点相对于它的板块运动，发现夏威夷热点、南大西洋热点、非洲提贝斯提热点等的位移量都很小，从而认为西太平洋岛弧系与这些热点组成了一个统一的系统，该系统可作为至少1000万a以来板块绝对运

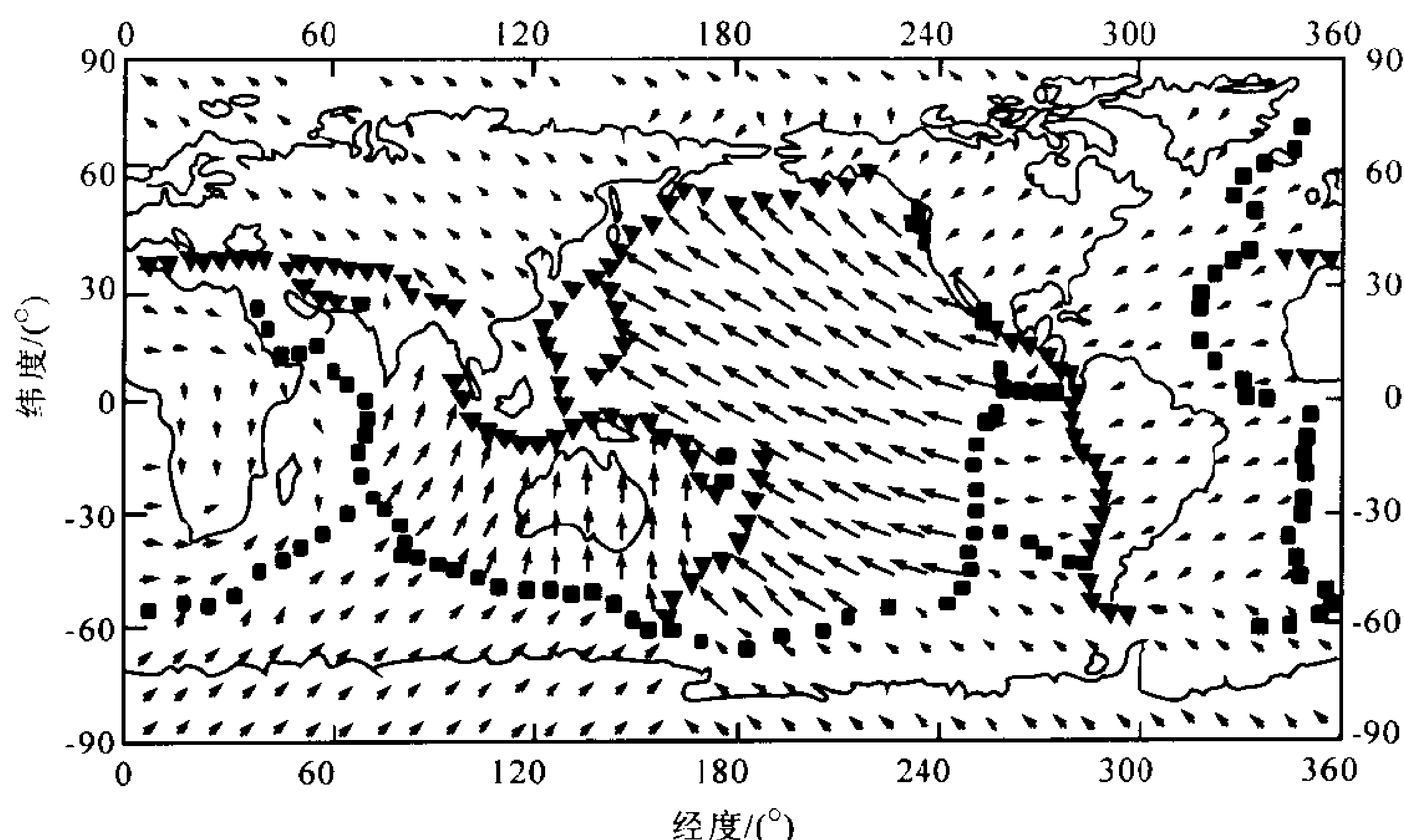


图 042－5　板块绝对运动 HS2－NUVEL－1 模型

动的参照系统。这样就大致标明了上述时间内各大板块的绝对运动，其中以太平洋板块的运动速率最大，它主要向西偏北运动；印度板块主要向北运动；北美和南美板块主要向西偏南运动。北美板块的旋转极位于白令海中，该极点四周的北美板块（部分）以及亚洲东北端均环绕该极做旋转运动，方向比较复杂；非洲板块的旋转极位于几内亚湾内，它基本上是环绕该极做左旋运动；欧亚板块主要是向西和向北运动，特别是更新世以来，亚洲大陆向北推移趋势明显。由此可知，板块的相对运动和绝对运动是不同的，以欧亚板块和太平洋板块为例，它们的绝对运动有可能都向西或都向东或向其他方向，但它们之间的相对运动则必须是相互汇聚的。这表明，板块绝对运动的旋转极，不同于一对板块之间相对运动的旋转极。

043 板块运动的驱动机制

地球作为一个处于转动状态的星球，它表层的板块运动显然



主要与地球的深层活动有关，因为很难想像没有任何与外层运动相应的深部运动。对此，地球科学家们提出了种种假设和推测，其中主要的是地幔对流说。

地幔对流的设想最早是由英国地球物理学家霍姆斯（A.Holmes）于1928年提出来的，霍姆斯的这一设想使大陆漂移说度过了它最为艰难的时期。由于这一猜想在当时过于超前，所以，对很多地质学家来说也很难对它做出评价，直到20世纪60年代经赫斯和迪茨等学者的努力，才使霍姆斯的“大陆被载在地幔对流传送带上移动”的这一设想成为光辉的学说（图043－1）。

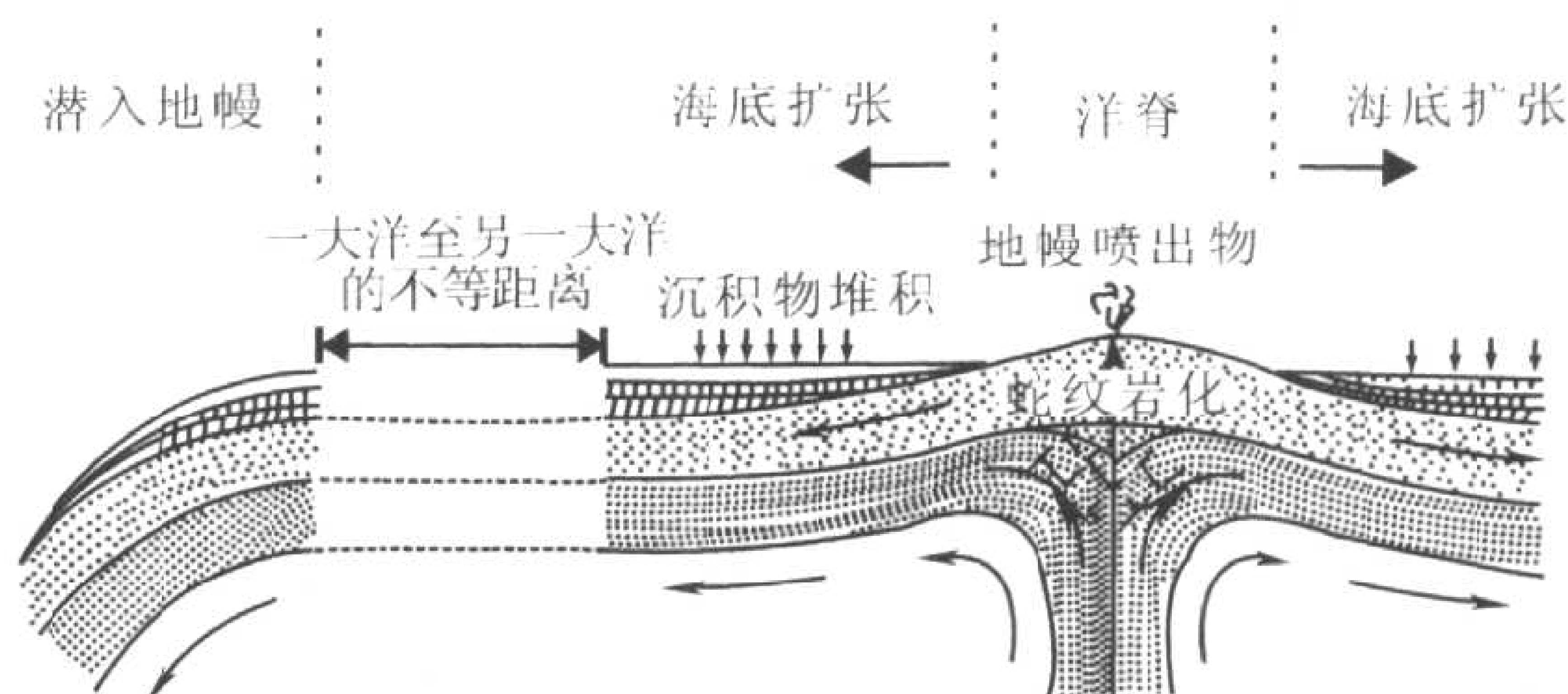


图043－1　霍姆斯提出的地幔对流传递带模式
传送带经过一段传送后潜入地幔）

现已得知，地幔对流是地球内部能量热力和重力联合作用的结果。尽管地幔基本上是固体的，但在高温及长期应力作用下能发生缓慢的塑性流动，热而轻的低密度物质上升，形成上升流，上升流在岩石圈底部附近向外扩散，转变为背驰的水平流，相向而行的水平流因热传导变冷而汇聚向下，形成下降流，下降流在地幔深处分散，形成反向水平流，尔后补给上升流，如此循环往复即形成了地幔物质的对流运动（对流环）。实验岩石学的证据是，借助室内高温—高压实验可精确地绘出熔点压力（深度）曲线，通过测定大陆、大洋的热流值可绘出温度—深度（压力）曲



线，将这两类曲线绘于一张图上即可分别求出大陆和大洋温度随深度增长曲线与熔点—压力曲线的两个交点，由于交点深度与地震波所确定的低速带与软流圈的深度大体一致，表明岩石圈板块可能是在其上发生位移的。另据艾里亚马（1977）的估算，地球演化期间丧失的能量约为 2.9×10^{26}J，其中地幔对流丧失的能量约为 2.1×10^{26}J，占72.4%，热传导丧失的能量占27.5%，其余为火山、热泉等所散失。因此，地幔对流是地球热能传递消耗的极为重要的机制，板块运动的能量可能主要是通过地幔对流供给的。因此，一般认为，驮在软流圈之上的岩石圈板块是由于地幔对流的拖曳作用而运动的，地幔上升流使板块分离，下降流使板块聚合。

关于地幔对流的模式，20世纪60年代一些学者主张对流可囊括整个地幔，而另一些学者则认为对流仅限于软流圈（图043–2），当时的倾向性意见则是软流圈对流。到了20世纪90年代，虽仍有两种不同的认识，即地幔分层对流（上地幔及上、下地幔分别各自对流）和全地幔对流，但最新研究成果的倾向性意见则是全地幔对流，因为分层对流的670km不连续面深度是一个 $(Mg, Fe)_2SiO_4$ 系统的矿物相转化深度，该反应为吸热反应，计算表明，仅靠此热效应还不足以引发地幔分层流动，地震层析技术也没有发现全球670km深处地幔的显著不连续现象，因此一些学者认为地幔分层对流只是局部的或边渡性质的，而全地幔对流则是主导性的，稳定的地幔物质循环方式。

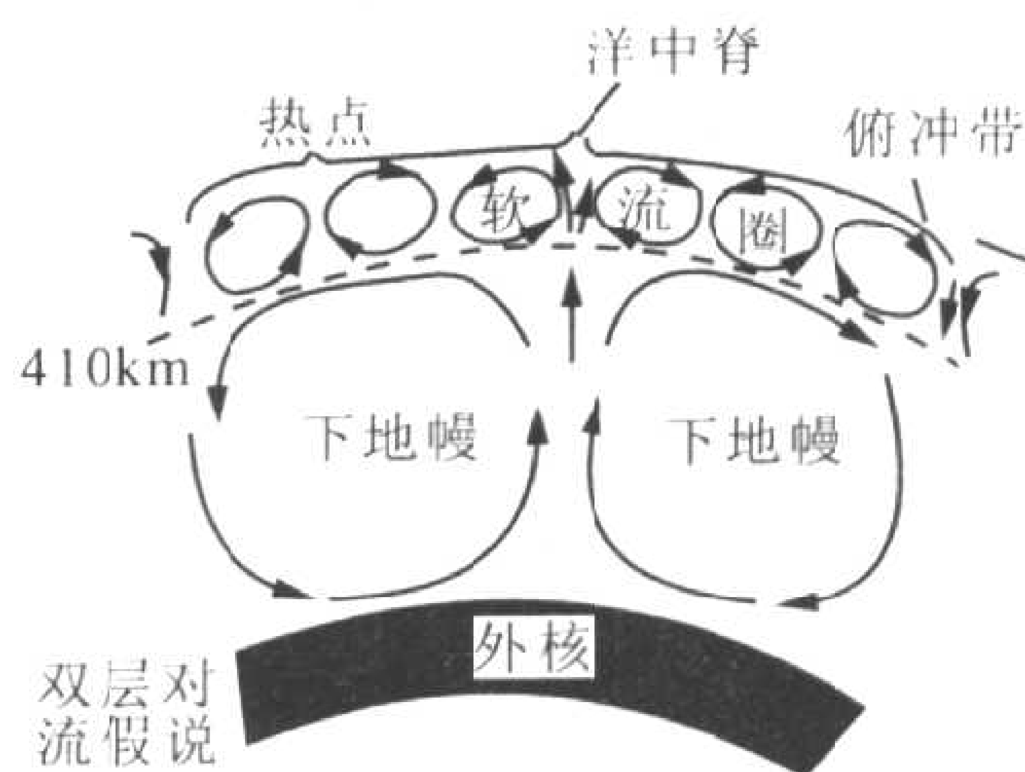


图043–2　整个地幔对流和软流圈对流（双层对流模型）

由于全地幔大尺度对流，对流空间较大（600～10000km），所以它仍然是全球板块构造的热动力学基础。对于一个宽约

8000km的对流环，如果板块运动的速率为2cm/a，则其完成一个对流循环的时间为1×10^9a。这一循环时间对于地幔动力学和构造学是很重要的。因为地球的年龄大约为4.6×10^9a，如果此种形态的对流开始于地球形成地幔及地核分异之后，那么地幔仅仅被搅动5次。因此可以认为地幔，特别是下地幔仍是不均匀的，它可能保持了分层之后的原始状态。上地幔小尺度对流，同样由于它的对流空间较小（500～600km），所以它可能在区域或板块内部构造学中起重要作用。层状（分层）对流并不在全球范围内发生，它可能是全地幔对流的一部分，也就是说，全地幔对流包括两种形态，单一环形对流和多层环形对流。D″层位于地幔底部，是一个厚200～300km的薄层，其对流尺度为100～200km的极小尺度热对流，虽然它更多的是受其内部对流系统的控制，但通常将D″层看做全地幔对流的下边界热边界层。热羽柱对流虽然并不能作为全球板块运动的驱动力，但它（热点）可以用来构

动框架来描述板块绝对运动。热羽柱的活动是连续的，但在
间尺度上它又具有一定的间歇性，这可用于解释热点轨迹
像。

块运动也还有运动板块本身对板块运动的动力源。主要有
动力：1. F_{SP}即俯冲板块产生的拉力，当冷的板块俯冲到
时，与周围地幔介质相比，由于下冲板块内部仍保持着
密度状态，所以产生了所谓重力负浮力，这一力拖曳着
动和俯冲；2. F_{RP}即洋中脊推力，根据计算①，这一
板块运动。

的驱动力问题到目前为止仍然是地球科学的一个悬

沿大洋中脊向两侧缓慢倾斜，其坡度只要达到1/3000就
滑动，足能满足现在观测到的板块运动速度（黑乐斯，

而难决的问题，虽然现在很少有人怀疑地幔对流的存在。这里的关键是板块的主要运动力源必须是在形成中脊和俯冲带之后才能存在，那么在此之前呢？这也许又落入了生命科学中“鸡和蛋谁先谁后”的古老怪圈中了。

044 大陆裂谷及其演化

正像大洋中脊上发育有大洋裂谷一样，大陆上也有裂谷发育，即大陆裂谷，它是发育于大陆地壳上的裂谷，是大陆地形的重要地貌单元，是大陆扩张的中心。大尺度观察，大陆裂谷是大陆表面一条窄长的巨型裂缝。所谓巨型，一是规模大，延伸很长，所发育的断裂切割很深，可切穿整个岩石圈；二是处于引张环境，从而区别于其他切穿岩石圈的大型断裂（如转换断层、缝合线等）。小尺度的地貌表现则是大陆上的纵长凹陷或低洼谷地和盆地。由于凹陷两侧往往被一系列高角度（50°~80°）正断层所围限，当然还可以被一系列横断层所切割，所以，大都表现为单一或复杂的地堑[①] 带，但也有仅在一侧为正断层所限的半地堑。裂谷底部通常有深水湖泊分布。世界上最深的湖泊——贝加尔湖（深1740m）即发育于贝加尔裂谷中，东非大裂谷中的坦噶尼喀湖，深度在1400m以上。

大陆裂谷的典型例子是东非裂谷带（图044-1），它南起赞比亚河下游谷地以南，自莫桑比克的贝拉港开始，向北延伸至马拉维湖，由此分为东、西两支裂谷带。东支裂谷带，沿维多利亚湖东侧，从南向北穿过坦桑尼亚和肯尼亚中部，大致经图尔卡纳湖向北进入埃塞俄比亚和索马里境内，之后裂谷再次分为两支，

---

① 地堑：两侧被高角度断层围限，中间下降的槽型断块构造。仅在一侧为断层所限的断陷称半地堑或箕状构造。与地堑相对应的是地垒。地垒是两侧被断层围限，中间上升的断块构造。

东支形成亚丁湾，西支伸向红海，并继续北延至亚喀巴湾、死海和约旦河谷地而告终；西支裂谷带沿维多利亚湖西侧，自南向北穿过坦噶尼喀湖、基伍湖、爱德华湖和艾伯特湖（蒙博托湖），再向北逐渐消失。整个裂谷带南北延伸跨越50多个纬度，长达6500km以上，宽度50～60km。裂谷带两侧高原上火山众多，巍然屹立。谷底大大小小的断层湖泊达30多个，湖形狭长，水深崖陡，沿裂谷带延伸线呈串珠状伸展。地质构造上，东非裂谷带由一系列阶梯状正断层组成，垂直断距为1000～2000m，最大可达3000m。裂谷为负布格异常，重力梯度与裂谷边界相一致，幅度约为－50mGal，热流值较高。东非裂谷西支基伍湖的热流值可高达4.4HFU。现代地震也很发育，主要为浅源地震，震源深度为15～30km。这都表明，东非裂谷是由地壳被拉伸开裂形成的。俄罗斯的贝加尔、德国的莱茵、我国的攀（枝花）西（昌）和汾（河）渭（河）裂谷也都是大陆裂谷，但规模要小得多。也有学者认为美国西部的盆岭省也属于大陆裂谷，但它是由一系列相间排列的地堑谷和山脊，即由地堑与地垒相间排列所形成的盆岭构造。

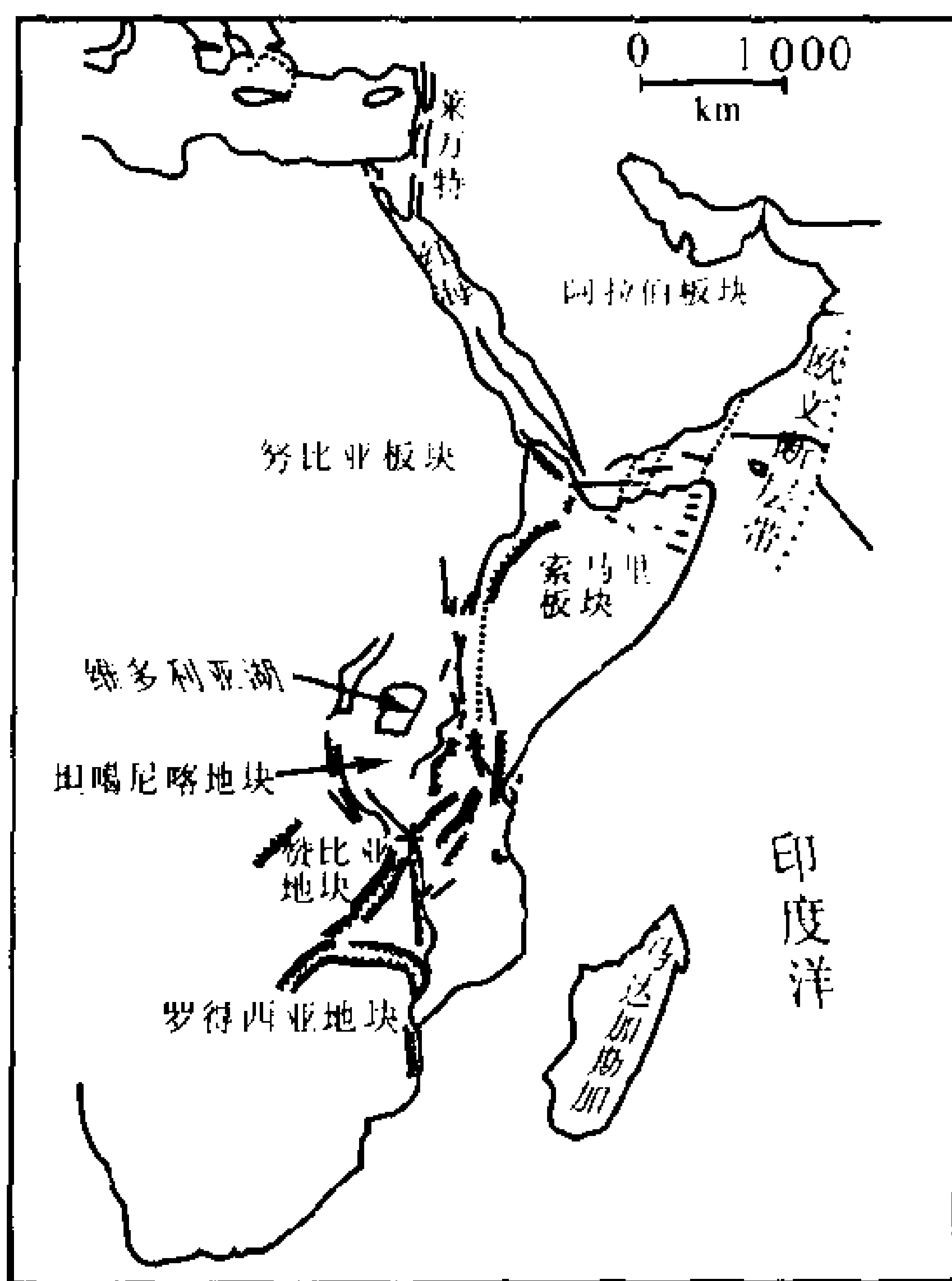


图044－1　东非裂谷分布图
（图中三角符号及粗实线为裂谷带）

大陆裂谷按形成方式，可分为主动裂谷和被动裂谷两种（图044－2）。主动裂谷是地幔上升的热对流长期作用，使大陆岩石圈减薄，上隆而导致破裂，然后出现凹陷而形成的裂谷，如东非裂谷、红海—亚丁湾；被动裂谷则是由于地壳的伸展作用或剪切

作用，使岩石圈减薄、破裂而形成的裂谷。

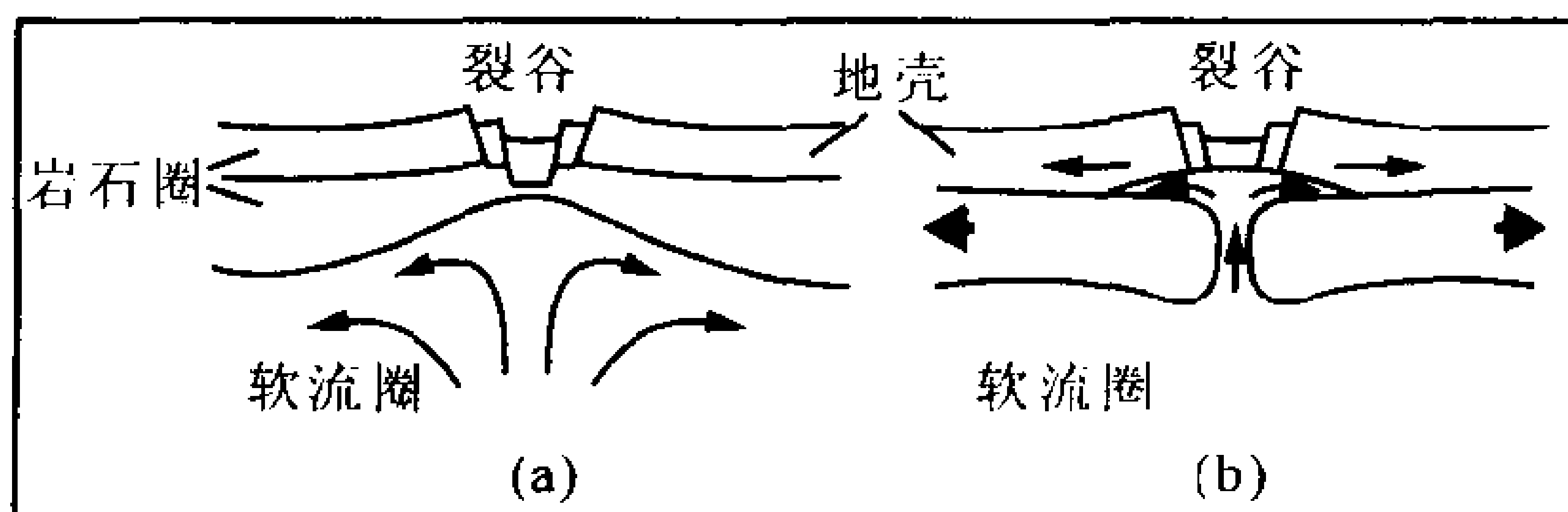


图 044-2　裂谷类型图
(a) 主动裂谷；(b) 被动裂谷

裂谷在板块构造中是大陆崩解、大洋开启的初始阶段，是洋盆的雏形，但并非所有裂谷都能演化成大洋。当裂谷中止开裂，停止发育时，裂谷就可被各类岩石所充填而失去裂谷的构造形态；当裂谷在三联点处发育时，可形成三支裂谷（三叉裂谷），每两支裂谷间的夹角均在120°左右（因为这种破裂方式所需应力最小）。若三支裂谷进一步张开即可发展成大洋盆地，形成三个板块。但较为常见的是，当其中两支裂谷被继续拉开以至发展成大洋盆地时，第三支裂谷就很难再被继续拉开，成为衰败裂谷（夭折裂谷）。例如从几内亚湾顶端延入非洲的贝努埃裂谷，是与南大西洋早期扩张有成因联系的裂谷（图044-3），与它相接的另两支裂谷

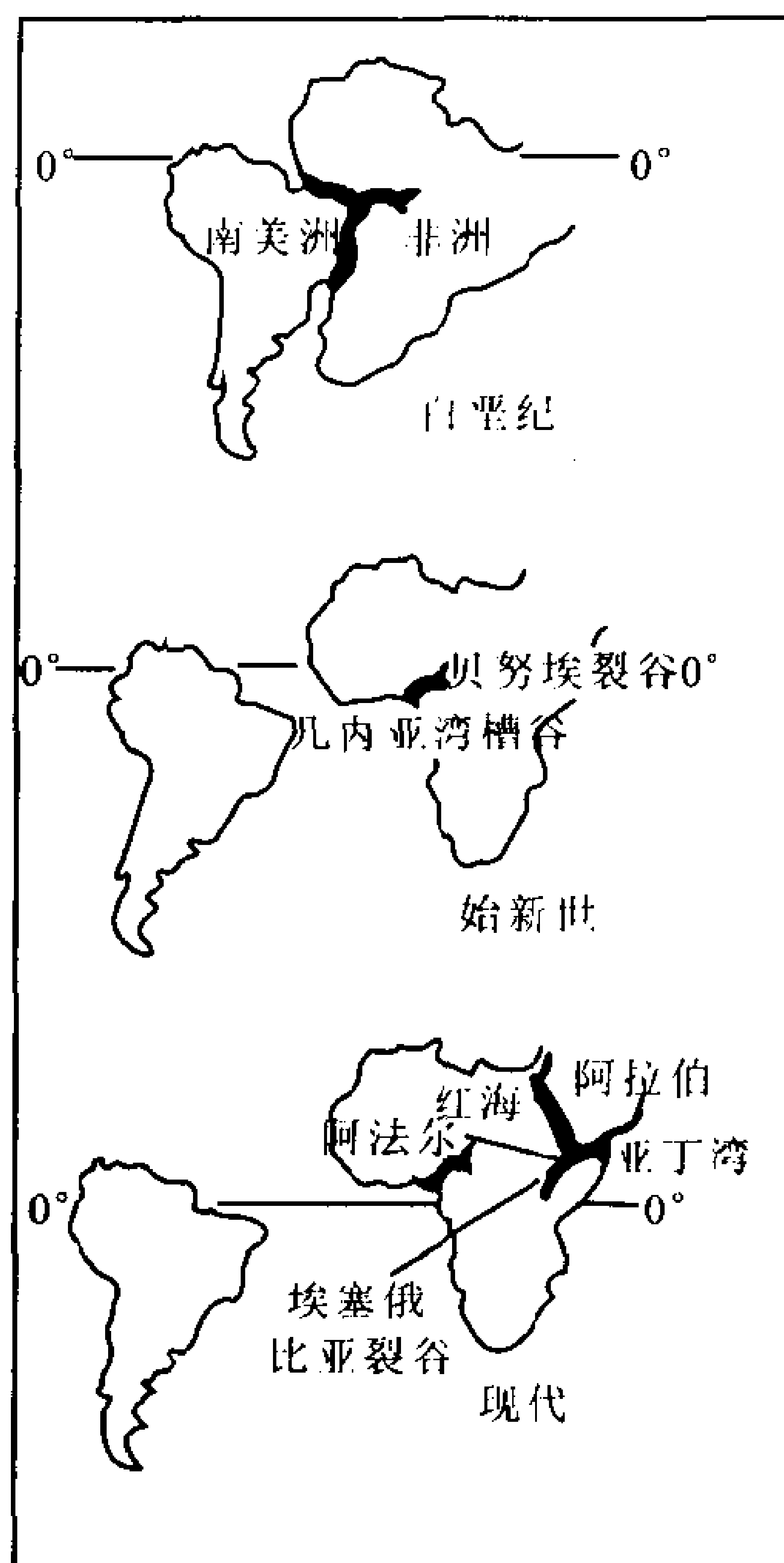


图 044-3　南大西洋的开启与贝努埃裂谷的形成

已扩张演变为邻接的大西洋，它却衰败成了裂谷的夭折支，至今已充填了4000~8000m的白垩纪和新生代陆相碎屑沉积。衰败裂谷之上常有流注于相邻新生洋盆的大河。如果日后南大西洋关闭，转化成褶皱带，则已夭折的贝努埃裂谷便留存于大陆内部。又如埃塞俄比亚裂谷，它与红海和亚丁湾构成三叉裂谷交汇于阿法尔，这是一个正在形成和发展演化的大陆裂谷，红海和亚丁湾未来可能发展成新大洋的一部分，而埃塞俄比亚裂谷的发展则可能与贝努尔裂谷相类似，成为衰败裂谷，并保留于大陆内部。

大陆裂谷演化一般认为有三个递进发展阶段。1. 穹形隆起阶段。上涌的热点—地幔柱导致地表穹形隆起，隆起高度1~2km，直径约200km。其上发育有正断层，伴有碱性及双峰系列岩浆活动，一系列穹窿可呈串珠状分布。2. 断裂下陷阶段。随着地壳拉张变薄，穹窿顶部断裂陷落造成地堑系。由于地堑系的沉降宽度可达5km甚至更大，并进而可发育成湖泊，所以该演化阶段也可称湖泊阶段。湖泊阶段拉张断陷所导致的压力释放更加剧了裂谷中的火山和岩浆活动。该阶段大陆裂谷的地貌与大洋中脊裂谷十分相似。3. 陆间裂谷阶段（红海阶段）。在这一阶段大陆因拉张作用完全裂开，并成为分离型板块的边界。比如红海，它的轴部已发育于洋壳之上，具有洋壳性质，但两缘海底主要仍是变薄的陆壳。大西洋西缘也仍保留着之前裂谷的遗迹，如碱性玄武岩、双峰系列火山岩及地堑相沉积，足见目前的浩瀚大西洋是从大陆裂谷发展演化而来的。大陆裂谷→陆间裂谷→大洋裂谷是裂谷发展的三个递进阶段，但并非所有大陆裂谷都能经历上述三个阶段。大陆裂谷可以长期处于微弱扩张阶段，如莱茵地堑，近45Ma以来仅扩张了48km；也可因应力场调整而终止于某一阶段，如墨西哥湾。

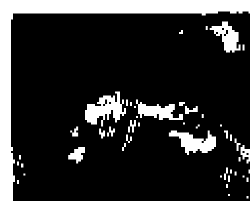
045 李四光及其构造体系

李四光是享誉海内外的我国著名地球科学家。1889年10月26日生于湖北省黄冈县，1904年留学日本，学习造船机械，1913年入英国伯明翰大学学习地质学，1918年获硕士学位，1931年获科学博士学位，1934年主持伦敦、剑桥等八所大学的"中国地质学"讲座，是挪威奥斯陆大学的荣誉博士、中国前中央研究院院士、中国科学院院士、前苏联科学院外籍院士，1971年4月29日在北京逝世。

李四光是地质力学的创始人。地质力学是一门自成体系的边缘科学，该学科对地球科学的贡献是多方面的，尤以构造体系最具影响力。"如果按照地质力学的观点和方法来解决大陆构造运动问题，我们就应该立足于确实可靠的构造现象，即构造体系"（李四光，1969）。

构造体系的定义是：地球表面不同形态、不同性质、不同等级、不同序次和不同方向，但具有成生联系的各项结构要素所组成的构造带，以及它们之间所夹的岩块或地块组合而成的构造总体。构造体系是全球性或区域性构造运动的产物，反映一定形式的构造应力场。构造体系可分为三大构造类型：纬向构造体系、径向构造体系和扭动（旋扭）构造体系。

纬向构造体系：是走向与地球纬度线一致的构造体系，又称东西复杂构造带，具有全球性质。它们往往按一定间隔持续或断续地出现在一定纬度上，主体构造为走向东西的强烈挤压带，大陆及洋底均有其踪迹。在我国境内纬向构造体系发育最好，主要有三条。1. 阴山—天山构造带，主体位于北纬40°~43°之间，绵延长约4000km。中间为阴山山脉，向西与天山山脉相连，向东越过燕山山脉埋伏于新华夏系沉降带之下，但在辽宁铁岭仍可见其踪迹，再往东延伸到日本北海道南缘。主要由老变质岩系组



成，并有花岗岩体和超基性岩体夹杂其中。2. 秦岭—昆仑构造带。主体界于北纬32°~35°之间，主要由走向东西的强烈挤压带组成，在中国大陆绵延达4000km左右。主体中段为秦岭山脉，构造上可分为两个亚带，北亚带由古老变质岩系组成，南亚带由古生代海相地层组成，形成一系列褶皱和冲断层。自秦岭往西与昆仑山脉相连，往东分为两支，一支经嵩山沉没于华北平原之下，另一支由伏牛山和大别山构造带组成，因受其他构造体系干扰而显得向南弯曲。秦岭—昆仑构造带曾发生过多次强烈构造运动，至现代还有活动。3. 南岭构造带，大致在北纬23°30′~26°30′之间，主体为南岭山地，出露长度2000km左右，包括闽南、赣南、湘南和粤北，由东西向的褶皱带及高角度正断层，以及东西向的花岗岩带及片段老变质岩系所组成。在台湾海峡至台湾西部平原表现为一隆起带。南岭构造带从新元古代到老第三纪经历了多次活动，但主要生成于中生代。

径向构造体系：走向大致与地球经度线一致的构造体系，也称径向构造带或南北向构造带，是全球性的构造体系。在中国境内主要是川滇南北向构造带，以四川西部的大雪山为主，向南一直延伸到云南中部的川滇构造带，再向南可延至泰国以至马来半岛。川滇南北向构造带至少从古生代开始发育，到中三叠世末基本形成，侏罗纪至近代都有强烈活动。在我国其他一些山区，如贺兰山脉、吕梁山南段、太行山南段、台湾山脉，以及湘南、赣中南、闽西也都有南北构造带存在。在世界其他地区也有南北向构造带，例如乌拉尔构造带、安第斯构造带、东非大裂谷、死海—约旦河谷，以及欧洲西部的莱茵河谷，南大西洋海岭、东印度洋海岭等也都是南北向构造带。

扭动构造体系：由地壳的某一部分对其毗邻部分发生相对扭动而形成，是区域构造运动形成的构造体系。按扭动方式可分为直线扭动和旋转扭动两种。由直线扭动形成的直扭构造包括



“多”字形构造、“山”字形构造、“入”字形构造和棋盘格式构造等构造形式；由旋转扭动形成的旋扭构造包括帚状构造、莲花状构造、涡轮状构造、“歹”字形构造，以及S形和反S形构造等。在亚洲大陆边缘及毗邻海域，由燕山运动所形成的一大套“多”字形构造即新华夏系是扭动构造体系的典型代表（图045－1）。它主要由NNE及NE走向的褶皱带、挤压带、压扭性断裂带所构成，并有NEE向的扭压性断裂带（泰山式构造）及NNW向的扭张性断裂带（大义山式构造）与之斜交。主体构造为规模相当宏伟的一级沉降带和一级隆起带。最东边的一条隆起带是东亚岛弧褶带，由千岛群岛、日本群岛、琉球群岛、台湾岛、菲律宾群岛和巴拉望等山脉构成；此带之西是沉降带，由鄂霍次克海、日本海、黄海、东海、南海等构成；再往西为第二条隆起带，由朱格尔山、锡霍特岭、张广才岭、老爷岭、长白山脉、狼林山脉，以及由胶东半岛山地至闽赣两省的戴云山脉及武夷山脉所组成。由第二隆起带

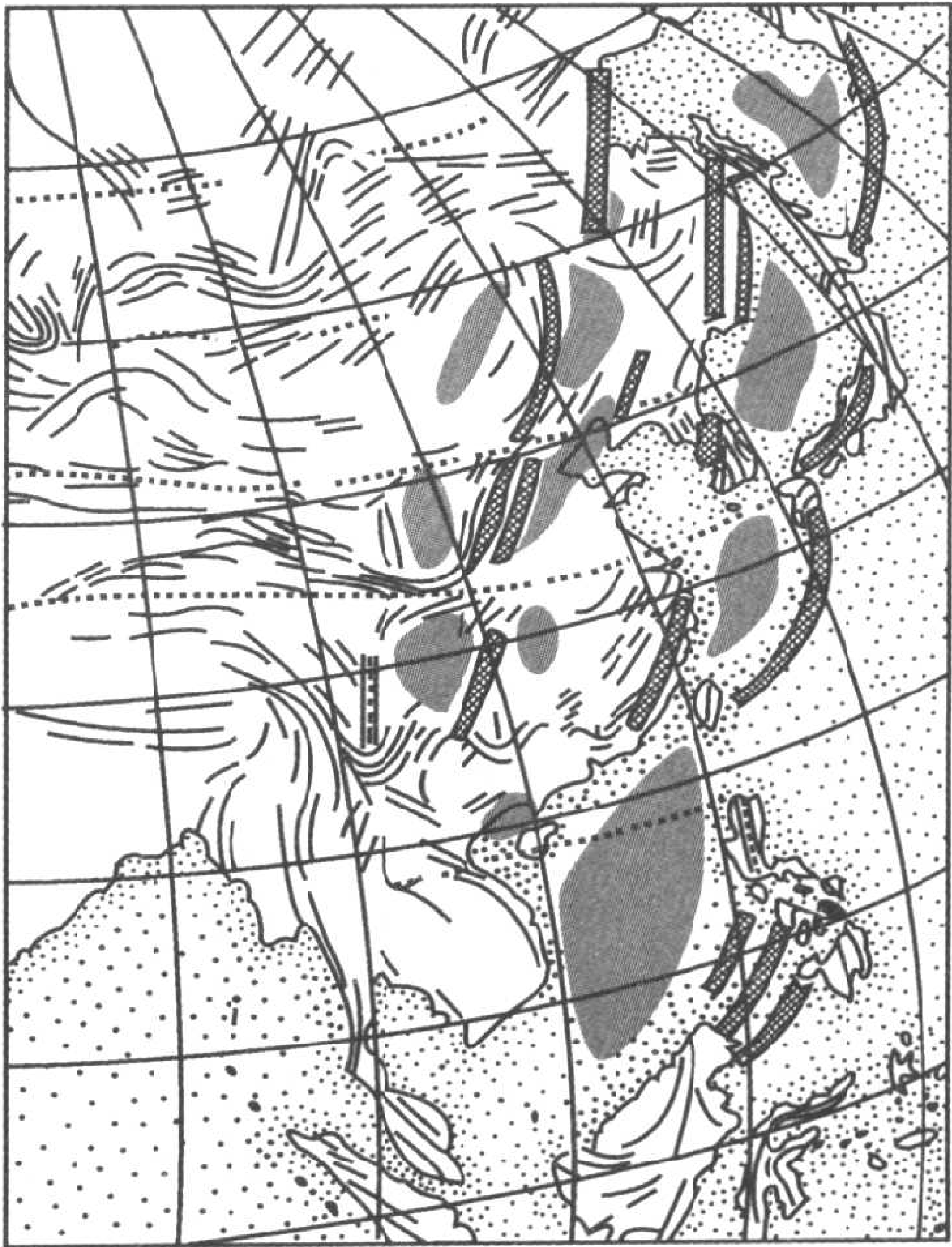




图045－1　东亚大陆新华夏系分布图

往西则是由松辽平原、华北平原、江汉平原以及北部湾等构造盆地组成的第二沉降带；再向西则是第三隆起带，由大兴安岭、太行山、雪峰山等诸山脉所组成；最西边则是由呼伦贝尔—巴音和硕盆地、陕甘宁盆地、四川盆地等所构成的第三沉降带。这第三沉降带和第三隆起带不是严格成一直线分布的，它们被阴山构造带和秦岭构造带所阻隔，自北而南逐段向西约略错开。新华夏系与东西向构造带的复合，是我国以及东亚地区的构造格架。

是什么力量按照上述方式推动了构造运动？地质力学认为，只有一种力量，那就是重力控制下地球自转速度变化所产生的惯性离心力和纬向惯性力。前者能造成地壳沿径向的水平运动，后者能造成地壳沿纬向的水平运动。

046 特提斯海的沧桑巨变

特提斯即Tethys的译音。Tethys一词是由奥地利地质学家修斯（E.Suess，1893）首创的，但一般认为，Tethys的含义则是德国地质学家诺伊迈尔（M.Neumayr）所称的“中央地中海”的改称。诺伊迈尔（1885）认为，侏罗纪时，在欧亚大陆南部和非洲大陆北部，存在着一个近东西向的赤道海洋，即中央地中海；修斯（1893）则认为，连接今日印度—非洲与欧洲之间的一系列山链正是当年特提斯海的位置。特提斯是古希腊神话中河海之神妻子的名字，由于现存在于亚欧非之间的地中海是现已消失的特提斯海的残留海域，故特提斯又称古地中海。

20世纪60年代依据古地磁等再造晚古生代联合古陆时，发现南（冈瓦纳）北（劳亚）大陆之间存在一个向东张开的喇叭形海域，这个海域学者们普遍认为即特提斯海或特提斯洋（图046-1），它代表两大陆间具洋壳基底的海洋及其两侧大陆边缘不同深度的海域，实际上它是泛大洋——古太平洋的一个海湾。之后随着对特提斯海研究的深入，以反映古地中海存在的缝合带及蛇



绿岩的地质时代为依据，又将代表晚古生代海洋的蛇绿岩带称古特提斯（第一特提斯），代表中生代海洋的称中特提斯，代表新生代海洋的称新特提斯，也有称中生代海洋为新特提斯的。

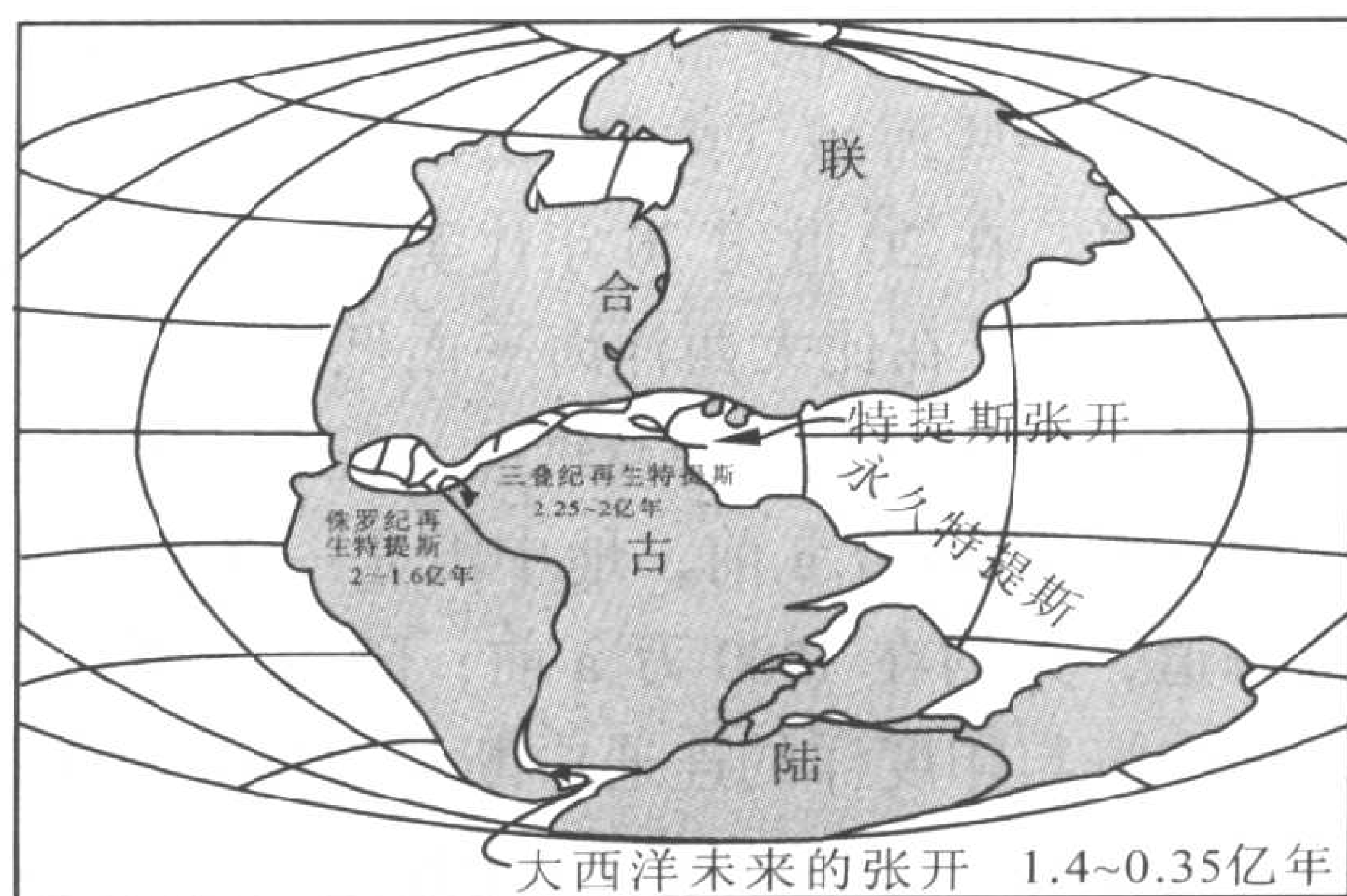


图 046－1 联合古陆复原后的 Tethys 海

古特提斯海（东段）的主体大致自伊朗和阿富汗北部始，经我国喀喇昆仑山和澜沧江，转入中南半岛，也有学者认为我国昆仑山、祁连山和秦岭也都属于古特提斯的范畴。晚三叠世时，随着冈瓦纳大陆边缘碎块（土耳其、伊朗中部、冈底斯、缅甸掸邦等地块）向北漂移并和劳亚大陆拼合，使这一可能自震旦纪晚期即已出现的古特提斯消失。

中特提斯海即三叠纪开始出现的特提斯海，位于古特提斯海以南，分布于现今的南欧（比利牛斯山、阿尔卑斯山、亚平宁山、喀尔巴阡山）和非洲北端，向东包括现今的黑海、里海以及从小亚细亚、伊朗南部、中国西藏南部直至中南半岛和印度尼西亚一带，再远至现今的澳大利亚，并与古太平洋相通。中特提斯的原始延展方向亦大致为近东西向，西段窄东段宽，是由冈瓦纳大陆边缘海进一步扩展而形成的。早中三叠世，中特提斯开始下陷，晚三叠世至早侏罗世，海区进一步开裂，以蛇绿岩套为代表

的洋壳开始形成，但其范围与早中三叠世不尽一致。侏罗纪中晚期至早白垩世，海区普遍强烈沉降，大洋扩张，原有的碳酸盐岩台地崩塌，洋壳继续形成。白垩纪中期，由于大西洋扩张和印度陆块向北漂移，特提斯洋开始萎缩。到早第三纪，中特提斯洋大部分被关闭，残留了一些海域（内海），如地中海、黑海及里海西部，特别是地中海，在20世纪70年代实施深海钻探计划时的地中海航次（1970）中，在比大西洋海平面低约3000m处找到了地中海沧桑巨变的干化（蒸发岩层及钾盐）证据。航次主持者许靖华教授等设想：在2000万a前，地中海是一条连通印度洋和大西洋的宽阔海道，大约在1500万a前，随着非洲板块和欧亚板块的碰撞，地中海与印度洋的连通中断，而与大西洋联系的也仅有西班牙南部的Betic海峡和北非的Riphian海峡。随着这两条海峡的最后封闭，地中海成了一潭死水。由于气候炎热，风急沙多，降雨量少，蒸发量大，地中海逐年缩小，最终形成了一些盐湖，盐湖不断干涸，导致这个位于海平面以下约3000m的中新世"死谷"的干化和荒漠化。盐度升高，环境恶化，使海洋生物消失殆尽，这就是被欧洲古生物学家所称的"地中海盐度危机"。"盐度危机"地层亦是地史上中始新世与上始新世之间的年代地层界线。

现存于大西洋与地中海之间的直布罗陀海峡，最早是阿尔卑斯造山运动所形成的，是横亘于大西洋和干涸地中海之间的一道长堤。大约在550万a前的再次构造变动，使直布罗陀长堤崩裂决口，大西洋海水漫过长堤和山崖，并以40000km^3/a的流量涌入地中海，于是形成了今日的直布罗陀海峡。尽管如此，由于干化地中海很深，专家们估计大约花了100多年的时间才把干涸的地中海重新灌满了海水。现今所见碧波万顷的地中海曾一度是干化过的古海荒漠，这似乎有些令人难以置信，但深海钻探证据确凿。地中海的干化也仅仅是地球表面沧海桑田巨变的一个侧面而

已，比大西洋开裂、南美与非洲漂离、喜马拉雅山崛起还差得远呢！

特提斯的科学研究和综合考察已经历了100多年，但是特提斯的故事并没有结束。历史表明，每当地球科学理论推陈出新，并出现创新突破时，特提斯总会迸发出新的火花，激起新的高潮。中国是特提斯的早期故乡①，中国科学家应当对特提斯有更多的贡献。

047 青藏高原隆升之谜

素有“世界屋脊”、“地球第三极”之称的青藏高原，位于亚洲大陆中南部，地处我国青海、西藏及四川西部，是以高（平均海拔4000m以上）、大（高原面积约240万km^2）、新（形成时代最新最年轻正在抬升）为特色的山地型高原。它被夹持于图兰、塔里木、中朝、扬子、印度等几个刚性地块（李廷栋，1997）之间，是由分割这些地块的缝合带拼接镶嵌起来的多地体（地块）拼合高原（图047－1）。其主要缝合带（孙鸿烈等，1997）有印度河—雅鲁藏布江缝合带（Ⅰ）、班公湖—怒江缝合带（Ⅱ）、西金乌兰湖—金沙江缝合带（Ⅲ）、昆仑南缘缝合带（Ⅳ）及西昆仑—阿尔金—祁连山缝合带（Ⅴ）。缝合带代表着曾经存在的海洋遗迹，两两缝合带之间的地块，在不同地质时期都曾经是独立的地体，各自都有着自己的运动路径，最后才拼接在一起，成为统一的高原。拼接的次序是自北向南，北早南晚。因此青藏高原的形成实际上就是这些地体（微板块）拼合的历史。印度次大陆与亚洲大陆在4000万a前发生碰撞，喜马拉雅拼贴到冈底斯南

① 以晚近地球板块海陆演化而论，俄罗斯西伯利亚、蒙古、中国东北及华北等，实际上都属于当今欧亚大陆的欧洲部分，是真正的东欧，而不是北亚。



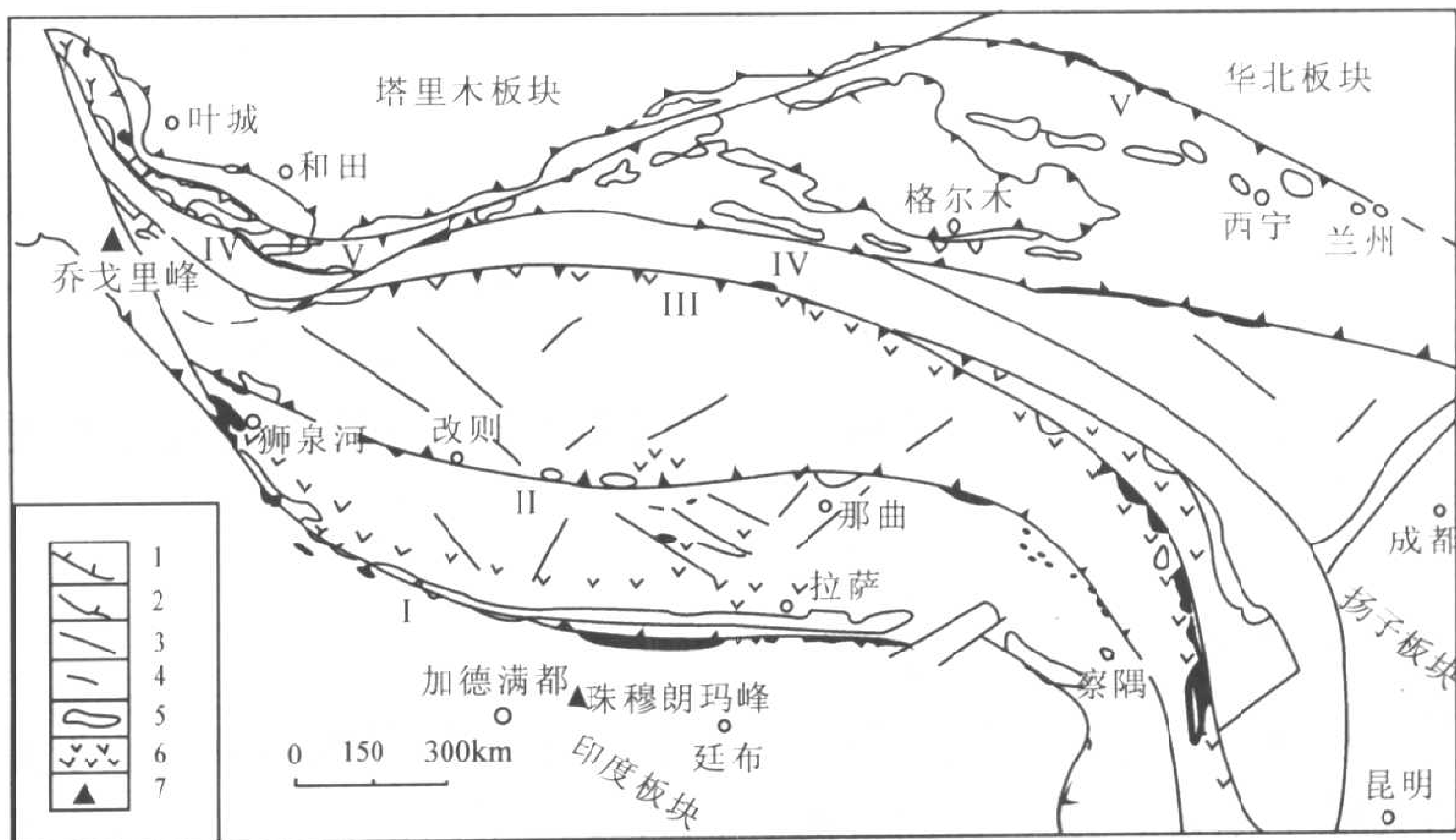


图 047 – 1　青藏高原构造简图
1. 缝合带；2. 盆地边界；3. 断层；4. 蛇绿岩；
5. 岛弧深成岩；6. 岛弧火山岩；
（据孙鸿烈等，1997）

缘，统一的高原即已形成，之后则是不断地抬升，并成为今天世界屋脊的态势。对此国内外学者曾提出过多种多样的解释模式，主要有 7 类（孙鸿烈等，1997），它们是：1. 双地壳模式；2. 多地体分阶段相继拼合模式；3. 滑动线场理论；4. 薄粘滞体模式；5. 注入模式；6. 挤压模式；7. 旋转模式。按主动力机制可归纳为具代表性的三类隆升模式（潘桂棠，1994）：1. 双倍地壳模式，认为印度（板块）地壳俯冲下插到青藏高原地壳之下形成双倍厚度地壳；2. 推土机模式，认为印度板块像推土机那样造成青藏高原地壳在水平方向上缩短和在垂直方向上拉长；3. 地壳侧向向东挤出模式，认为受印度板块斜向碰撞而使青藏高原地壳侧向向东逸出。按模式动力源大体上可区分为三类（李廷栋，1997），第一类是以印度板块挤压力为动力源的俯冲碰撞模式，第二类是

以垂向负荷力为动力源的重力作用模式，第三类是以水平挤压和垂向负荷为动力源的双挤压模式。第三类模式也是目前最为盛行的一种模式，认为青藏高原隆升的动力源主要是来自印（度）澳（大利亚）板块持续向北的漂移挤压和楔入到高原之下，以及亚洲大陆刚性地块的抵阻和反向楔入。深部热动力也起了很大作用。20世纪90年代的地球物理资料表明，青藏高原地壳的加厚和缩短都是在近南北向的压应力作用下实现的。上地壳主要是通过岩层的褶皱、逆冲和推覆（叠瓦构造）而导致地壳叠覆加厚的。因挤压而造成不同层次的滑脱、拆离所引起的岩浆贯入和喷出也是地壳加厚的重要因素。中地壳由于波速比较稳定，分层性差，物质组分比较均匀，所以可能是通过塑性褶皱和深位韧性剪切来使地壳缩短加厚的。下地壳除塑性变形、蠕变和韧性剪切外，其下的下地幔物质的部分熔融流体涌入下地壳，形成“壳幔混合层”，可能也是造成下地壳加厚的重要因素。由于地壳不断加厚，高原不断抬升，上地幔不断下降，所以形成了“高原山根”，在“山根”作用下所产生的强烈均衡调整，使高原大幅度整体快速隆升。如此反复进行（地体陆内汇聚—地壳分层加厚—重力均衡调整），便形成了当今壮丽雄伟的青藏高原。从隆升过程看，青藏高原的隆升大致经历了三个阶段。

俯冲碰撞隆升阶段：自晚白垩世始，印度板块向北漂移的速度从开始时的15～20cm/a到始新世中期急剧降低为小于10cm/a，标志着新特提斯洋的完全封闭，印度板块和欧亚板块碰撞焊接。碰撞焊接的标志是两板块全面碰撞后所产生的双磨拉石带[①]，表明当时的冈底斯（山）已抬升到一定高度，从所产植物群（棕榈科榕属）判断，这一高度为海拔1000～1500m。

① 磨拉石带是强烈隆起的山脉受到强烈剥蚀而快速堆积于边缘凹陷或山间凹陷中的以砾岩—砂岩为主的沉积岩带。

汇聚挤压平衡阶段：始新世末印度板块与欧亚板块完全碰撞拼合，二者的南北聚敛速率下降到5cm/a左右。已结合为一体的印（度）澳（大利亚）板块持续向北推移挤压，高原北部及东部的刚性地块相应抵阻，高原地壳仍在缩短加厚，但此时的构造抬升与剥蚀夷平已基本处于动态平衡状态，中新世末青藏高原所出现的准平原面即为佐证。从藏东中新世植物群的产出特征判断，渐新世—中新世的高原海拔为1000~1500m，但喜马拉雅地区是例外，中新世时该地区形成了大规模的冲断、推覆及滑脱。主中央逆冲断裂（MCT）及主边缘逆冲断裂（MBT）相继活动，在喜马拉雅南缘形成了一系列构造盆地，在孟加拉湾形成了深海冲积扇。此时期喜马拉雅主峰的海拔高度可能为2000~3000m。

均衡调整隆升阶段：经过渐新世—中新世期的隆升、夷平，自上新世开始，青藏高原进入一个以大幅度整体块状快速隆升为主的新时期。上新世—早更新世仍以压应力为主，以构造抬升为主导；中更新世以来，以张应力为主，以整体均衡隆升为主导。据学者们广泛研究，目前喜马拉雅的高地势即为中更新世以来整体快速隆升的结果。

青藏高原的隆升幅度，目前尚无统一意见。一般认为上新世末青藏高原的平均高度（海拔）在1000m左右，但也有学者认为在2500~3000m之间。如按青藏高原强烈隆起前，原高原面高度(平均）为1000m，现高原面高度（平均）为4500~5000m推算，则至上新世末以来的近200万a间，青藏高原强烈隆起的幅度可达3000~4000m，上升量（隆升速率）平均为2mm/a左右。而在晚更新世的10多万年中，其隆升幅度达1000多米，上升速率为10mm/a左右，此与我国于20世纪80年代所进行的高精度水准测量所获得的青藏高原平均上升速度为5.8mm/a的结论属同一数量级，基本一致。

048 黄土与黄土高原

黄土是一种黄色（灰黄色或棕黄色）的第四纪土状堆积物，是一种重要的成土母质，广泛分布于北半球中纬度（35°N～45°N）干旱（沙漠外围）及半干旱地区，总面积约1300万 km^2，占全球陆地面积的8.7%。

我国是世界上独一无二的面积(厚度)最大的黄土分布区，总面积约63.1万 km^2(刘南威等，2000)。分布范围大致在长城一线以南，秦岭以北，太行以西，贺兰山以东地区，主体位于甘、陕、晋三省，连续分布面积达44万 km^2 以上(刘东生等，1965)。黄土厚度一般为50～100m，六盘山以西厚度较大，在180～200m以上，陇西一带超过300m。据实验测试，黄土的颗粒细小，质地均一。颗粒中以粉砂(粒径0.05～0.005mm)为主，占总量的60%以上，而大于0.25mm的颗粒罕见。其次为粘土(小于0.005mm)占10%～25%；碳酸钙占10%～25%，容重1.3～1.6，孔隙率为40%～50%。矿物组成以石英为主，粘土矿物主要为伊利石，含少量高岭石和蒙脱石。黄土无层理，但垂直节理发育。

据野外调查，中国黄土生成于第四纪更新世冰期时代。陕西洛川剖面是其标准剖面之一（刘东生等，1985），被分成4个岩石地层单位。从黄土堆积底界到 L_{15} 底部为午城黄土[①]。午城黄土是第四纪的下界，该界线接近松山反向极性时与高斯正向极性时的界线，年龄大致为2.5Ma，因此中国使用2.5Ma B.P（距今）作为第四纪的下界。从 L_{15} 底到 S_5 顶为离石黄土下部，从 S_5 顶到 L_1 底部为离石黄土上部，L_1 为马兰黄土。马兰黄土上覆全新统

① 在地层研究中，习惯上以L代表黄土层，以S代表古土壤层。洛川剖面共划分出15个古土壤层（从上到下为 S_0～S_{14}）和15个黄土层（从上到下为 L_1～L_{15}）。



(Q_4) 古土壤 S_0。古土壤是间冰期暖湿气候的产物。

黄土的成因有残积说、水成说(灾变水成说)和风成说,以风成说为主。我国黄土高原自 NW 而 SE,黄土颗粒逐渐变细,厚度逐渐减薄,依次构成沙黄土带—黄土带—粘黄土带(刘东生等,1966),连续分布的中国黄土高原即为风成沉积物的典型实例。黄土高原是我国现代地形三大阶梯(青藏高原—黄土高原—东部平原)中第二级阶梯地形的重要组成,以六盘山和子午岭为界可分为三部分(张宗祜等,1996),六盘山以西为西部黄土高原(陇中黄土高原),六盘山以东至子午岭为中部黄土高原(陇东黄土高原),子午岭以东至吕梁山为东部黄土高原(陕北黄土高原)。陇中黄土高原海拔 1800 ~ 2000m,陇东黄土高原为 1400 ~ 1600m,陕北黄土高原为 1200 ~ 1400m。高原内沟谷纵横,高原以西山脉走向的 NW 向为主,主要有拉脊山、祁连山和南华山等;中部和东部山脉走向呈 SN 向分布,主要有六盘山、子午岭及吕梁山等。

黄土高原的黄土地貌可分为三大类:沟谷地貌、沟间地貌和潜蚀地貌。沟谷地貌的沟谷类型齐全,包括细沟、切沟、冲沟和凹沟。沟谷密度也很大,据统计为 4 ~ 6km/km^2。潜蚀地貌是由地表水潜蚀作用形成的黄土地貌,主要有黄土碟即碟形洼地,黄土陷穴即由黄土湿陷作用而形成的漏斗状或竖井状洞穴,以及黄土桥及黄土柱。沟间地貌包括黄土塬、黄土梁和黄土峁。黄土塬是高原上面积广阔(一般为几十平方千米)、地面平坦(塬面坡度中部小于 1°,边坡为 3° ~ 5°)的黄土平原。黄土塬经沟谷强烈分割呈指状者称破碎塬,沿河谷阶地分布的黄土台面(台面向河谷倾斜)称黄土台塬。黄土梁是平行沟谷分布的长条形高地,宽度大于 100m 者称宽梁,反之称窄梁,梁顶一般覆盖着上更新统黄土和现代堆积。黄土峁即孤立的黄土丘(穹状或浑圆状)。黄土塬—黄土梁—黄土峁之间的关系,基本代表了黄土丘陵区流水对黄土的侵蚀强度及其演化的过程。



黄土高原地形地貌的形成，与区域晚新生代以来的新构造运动① 有关。首先是强烈剥蚀侵蚀作用，这一作用使基岩山区形成的大量泥沙等碎屑物质堆积到山前低洼地带或盆地中，形成以红色粘土、砂质粘土及粘砂土为主的地层。与此同时也塑造了现今黄土高原内残留的基岩山区、低山山前盆地边缘区和盆地区三种古地貌类型。进入第四纪，整体处于区域性上升活动中的黄土高原，以北部（白子山—华家岭一带）强烈上升（上升速率达0.8mm/a）、南部（渭河盆地）不断沉降（第四纪以来的沉陷幅度至少在1000m以上）的差异性升降运动为主。这一运动趋势至今仍在继续，是塑造黄土高原地貌格局的基本动力。

黄土高原是全球最壮丽的自然景观之一，是华夏文明的重要发祥地。历史上人类活动频繁，植被破坏严重，造成了强烈的水土流失，而黄土高原本身，在原有自然切割的基础上，又形成了千沟万壑的地貌景观，荒山秀岭，植被稀少，是我国水土保持的重点地区。

049 大别苏鲁超高压变质带

在地球表面的一定部位，主要是陆—陆碰撞（A型俯冲）造山带中，含有柯石英、硬玉和金刚石微粒等矿物② 的岩石被称为超高压变质（UHPM）岩石。UHPM岩石广泛出露的地带称UHPM带，如挪威加里东造山带中的UHPM带。在全球的UHPM带中，以大别苏鲁超高压变质带规模最大，各种UHPM矿物出露

---

① 地球演化中最新的构造运动，对现代地形的形成起重要作用，其起始时间，一般认为是新第三纪。

② 20世纪80年代以来的实验岩石学证明，在温度大于300℃，如果压力在25×10⁸Pa以上，石英将转化为柯石英；在30×10⁸Pa以上，蓝闪石转变为滑石加硬玉；在更高的温度及压力下石墨将转变为金刚石。

最全、最密集。

大别苏鲁超高压变质带，西起河南信阳，过湖北红安、安徽岳西、潜山后被郯（城）庐（江）断裂切割，北移至苏北新沂和东海，后经山东日照、胶南延至山东半岛最东端的荣成和威海。从大别苏鲁超高压变质带的产出地质构造特征判断，它是华北与扬子板块之间秦岭造山带的一部分，或者说是秦岭造山带的一组地体。反射地震剖面也显示，苏鲁地区的地壳具有典型的碰撞造山带特征，中下地壳充满了反映碰撞的楔形体（杨文采，1997）。另据区域反射地震剖面资料，一组向南倾伏的强反射体已下插到莫霍面附近，在地表它与韧性剪切带（逆断层）相吻合，推测可能与折返事件有关。

大别苏鲁超高压变质带的主要地质特征是：1. 柯石英、硬玉和金刚石赋存于榴辉岩中，而榴辉岩则赋存于基性—超基性岩及大理岩以及片麻岩中；2. 榴辉岩大多呈条带状或透镜状产出，与围岩接触界线可以呈渐变关系，因此目前认为围岩与榴辉岩共同经历了超高压变质作用；3. 东海毛北地区的大片榴辉岩与超基性岩穿插在一起，可能是从深部返回的地幔楔；4. 榴辉岩的原岩可以是幔成榴辉岩，也可以是壳成榴辉岩，前者是地幔玄武岩浆结晶分异而成的，后者可能是元古宙泥灰岩经壳幔变质作用而成的；5. 实验岩石学研究表明，UHPM岩石在三叠纪时所经受的压力大于 26×10^8Pa，温度为600℃～900℃；6. 韧性剪切带非常发育，它们可能与UHPM岩石的折返有一定关系；7. 大别山UHPM岩石的形成主期为220～240Ma，苏鲁UHPM岩石为210～220Ma，比大别山略晚；8. 苏鲁UHPM的 $P-T-t$ 曲线① 比大

① $P-T-t$ 曲线所反映的是某一岩石从其变质历史的起点到终点（时间 t）所经历的温（T）压（P）条件的连续变化轨迹。不同构造块体具有不同的 $P-T-t$ 轨迹。

别山更高（许志琴等，1998），反映俯冲的部位更深。此外，$\delta^{18}O$值很低（-10左右），说明超高压变质时极少氧逸出，可能处在干冷和封闭的环境中。

关于超高压变质带形成折返的动力学模型，目前比较流行的解释是拖曳反弹折返假说，其主要论点是：较重海洋板块的拖曳造成陆—陆俯冲，拉断后造成俯冲岩块的快速反弹，从而使 UHPM 岩块折返回到中上地壳。假说认为，在华北板块与扬子板块碰撞之前，即古生代末期，两者之间存在有宽度小于 200km 的洋盆，海洋板块（扬子板块）向华北板块下方俯冲。晚三叠纪海洋封闭，而已俯冲的海洋板块拖着大别—苏鲁地块继续向下俯冲（陆—陆俯冲），当俯冲到 80~120km 深度时，下方拖曳的海洋板块被拉断，或者被侧向错断，从而使上部的大别—苏鲁地块返弹折返回到地壳上部。反弹作用力或者是像橡皮筋被切断时的反弹力，或者是较轻的重力负浮力，从俯冲到折返的总时间大约在 2000 万 a 左右，其中折返较快的时间约 5Ma。在折返过程中除保存了柯石英及金刚石外，还带回了华北板块下部地幔楔中的岩块，如苏北东海地区的超基性岩，而在南部可能由于岩块俯冲较浅，所以只出现高压变质带。之后部分 UHPM 岩石退变成片麻岩、角闪岩或英云闪长岩，经燕山运动隆升后出露地表。

以上拖曳反弹折返假说虽然道理简明，但由假说假设的与洋壳俯冲有关的蛇绿岩带和古生代末期的火山链，以及冈底型花岗岩等到目前尚未发现，俯冲板块被拉断或错断的证据也较缺乏，扬子板块俯冲到苏鲁地块南缘而造成的逆断层，以及正断层及前陆盆地，还需要地球物理资料予以证实。还有俯冲深度，如果大陆地块俯冲到地幔 400km 转化带，其折返机制就很难用反弹机制来解释了。

目前我国正在东海毛北实施 5000m 科学钻探，通过对钻探岩心和流体的系统分析，以及同位素测定和岩石物理实验，将为大

别苏鲁UHPM岩石的折返机制提供依据，从而搞清板块俯冲、陆—陆碰撞和苏鲁地块折返的原因，推进岩石圈演化和大陆动力学理论框架的建立。地球科学家们普遍认为，大陆上的主要地质作用其根本原因都在地幔深处，利用大陆科学钻探，以及地球物理、地球化学探究地幔动力学过程，必将导致地球科学的再一次重大革命。

050 中国及邻区板块构造轮廓

发端于20世纪60年代的地学革命——板块构造学说，于70年代由中国地质学家户赞勋、李春昱、郭承义等率先引入我国。20世纪80年代李春昱等以蛇绿岩带、混杂堆积、双变质带、岩浆岩组合、深大断裂，以及地震震中分布及古地磁极移曲线为依据并结合地层分区，对显生宙以来的中国板块进行了划分，90年代程裕淇等（1994）以李春昱等的板块划分为基础，又对中国板块进行了再划分。划分的主要根据是，晚元古代以来陆间曾以大洋相隔。我国显生宙以来的板块由5条代表古大洋板块的结合带，将其（含台湾岛）划分为6大板块，以塔里木—华北板块、华南板块和藏滇板块为主体，并包括西伯利亚板块、印度板块和菲律宾海板块的一部分。最近车自成等（2002）从教学出发将中国及邻区划分为9大板块，即西伯利亚板块、巴尔喀什—南蒙古—佳木斯联合板块、卡拉库姆—塔里木—中朝板块、华南板块、伊朗—藏滇—印支联合板块、印度板块、俄罗斯板块、太平洋板块及菲律宾板块。现择要分述如下。

西伯利亚板块：是我国最北部的板块，归属西伯利亚板块，是因为板块的核心部分不在我国，而在俄罗斯境内，以主体命名，故为西伯利亚板块。西伯利亚板块南缘为准噶尔—兴安陆缘活动带，地跨中、蒙、哈、俄边境，以伊林哈别尔尕—西拉木伦

结合带① 与塔里木—华北板块北缘的天山—赤峰陆缘活动带联结，共同组成西贯中亚，东临日本海的天山—兴安褶皱区。该褶皱区包括了亚洲北部一系列著名的山脉和大型盆地，如阿尔泰山、天山、兴安岭、长白山和准噶尔及伊犁、吐鲁番—哈密、二连、嫩（江）松（花江）盆地等，其总体显示出在南北两大板块夹持下，由一些微地块和不同时期的线形褶皱造山带交织镶嵌所形成的构造格局。此外，在本区东部还有由锡林霍特褶皱带（活动带）推覆而来的，呈板片出现的完达山板片。

塔里木—华北板块：以塔里木—华北陆块为核心（陆块是板块的Ⅱ级构造单元），北与天山—兴安地区为邻，南与昆仑—秦岭接壤，自西向东横亘中国，是中国板块构造框架中的骨干板块。它的北部边缘是天山—赤峰活动带，南部边缘是昆仑—秦岭活动带北带，中西部为塔里木陆块，中东部为华北陆块。华北陆块根据地球物理资料，由东向西地壳依次增厚。重力异常图显示有两条显著的、反映岩石圈厚度陡坡带的重力密集梯度带，一条是大兴安岭—太行山—武陵山梯度带，另一条是贺兰山—龙门山梯度带。航磁异常轴向图显示有两条近东西向的线性异常带，一条是燕山—阴山正负轴向相间北缘异常带，另一条是平凉—西安—栾川—合肥南缘异常带。这两条 EW 向磁性异常带与上述两条 NNE 向重力梯度带共同组成了以块为主、块带结合的“块带结构”网络。但塔里木陆块则不同，它是南北边缘厚、中央薄的盆地地壳结构，从中央盆地到边缘，地壳厚度由 38km 递增到 65km。航磁图显示它是以带为主的具“带状结构”网络，盆地发展连续性强，沉积厚度大（基底埋深 8 ~ 15km），是我国埋藏最深的盆地。

塔里木—华北板块与华南板块之间的昆仑—秦岭是一条十分

① 亦称艾比湖—西拉木伦板块结合带。

复杂的叠加型复合造山带。南北两大板块于晋宁期（晚元古代）碰接，古对接带是康西瓦—商南—荣成结合带，即通称的秦昆结合带。以该带为界将昆仑—秦岭活动带分为北带和南带。北带是塔里木—华北板块的南部边缘，南带是华南板块的北部边缘。根据近年研究，晋宁期（晚元古代）后，南北两大板块间并未形成东西连通的大洋。加里东期（早古生代）华北陆块曾与塔里木、扬子陆块分离，其间为祁连—秦岭裂谷带，有小洋盆出现，加里东运动使裂谷基本闭合；华力里期（晚古生代）和印支期（早中生代），塔里木陆块与扬子陆块间为西宽东窄的特提斯洋，但洋盆未曾到达秦岭东段。

华南板块：以华南大陆为主体，包括陆缘海域及南海诸微陆块。东南前缘以台（湾）东纵谷板块结合带与菲律宾海板块联结，西部以空喀拉—澜沧江板块结合带与藏滇板块并接。可划分为7个二级单元：昆仑—秦岭活动带南带；扬子陆块，是华南板块的核心陆块；南华活动带，它与扬子陆块的拼接带属加里东A型俯冲带；羌北—昌都—思茅（微）陆块及松潘—甘孜活动带，二者都处于扬子古陆西缘与冈瓦纳古陆的结合部位，向北变窄，经新疆延入帕米尔，向南则进入东南亚；我国南海盆地的琼南（微）陆块及属菲律宾海板块的台湾活动带。围绕华南陆缘的南黄海和东海大陆架，分别是扬子陆块和南华活动带的水下部分，南海则是南海陆块裂解后新生的具有洋壳结构的边缘海，琼南（微）陆块是其残留陆块。处于华南板块与菲律宾海板块结合部的台湾活动带，是中生代俯冲型与新生代弧—陆碰撞型复合造山带。台东纵谷是我国东南最重要的板块缝合线。华南板块格局较为复杂，但以扬子陆块与南华活动带两大次级构造单元南北分野为基础，以中新生代以来“向洋分带”为主导的总体框架则是比较清楚的。

藏滇板块：位于雅鲁藏布江板块结合带与空喀拉—澜沧江结

合带之间，属于土耳其—中伊朗—冈底斯中间板块（冈瓦纳大陆基麦里中间陆块）的中国部分，是从冈瓦纳大陆分离出来的陆块，它的两侧分别为新特提斯和古特提斯的潜没带。藏滇板块的主体是羌中南—唐古拉—保山陆块及南侧的冈底斯—腾冲活动带。

印度板块：指我国藏南地区，因板块主体在印度境内，故称印度板块。实际上我国藏南，即印度河—雅鲁藏布江板块结合带及其以南地区为印度板块的北部延伸部分，是印度板块的一个板片——喜马拉雅逆冲板片，板片之南则为印度陆块的我国部分，二者都是新特提斯阶段冈瓦纳大陆向北延展的陆缘部分，始新世（E_2）末拼接于藏滇板块，渐新世（E_3）末，由于印度板块自北而南的逆推、翘折而产生西瓦里克主边界断裂，即印度板块的A型俯冲边界，使二者成为冈瓦纳古陆分离的小陆块。

板块构造理论的出现和实践，从根本上否定了传统地质学的观念，使人类在对地球的认识上有了一个很大的飞跃，“地球科学已经从过去拘泥于对自然现象的平凡解释和事实的罗列中解脱出来，把相互割裂的各分支学科组合起来，构成一门富有生命力的统一的科学”（J.T. 威尔逊，1967）。中国地质构造复杂多样，因此查清中国板块构造的发生、发展及演化，无疑是对正在快速发展中的地球科学的重要贡献。

三、资源、环境与灾害

051 地球自然资源中的矿产资源

自然资源，在现代技术条件下，根据其形成条件、共生组合、空间分布及其与地球各圈层的关系等，通常将其分为矿产资源、土地资源、水利资源、生物资源、气候资源和海洋资源6大类。矿产和土地资源都分布在岩石圈中，它们都是经过漫长的演化和积累才形成的，质与量是有限定的，空间分布也是不均匀的，被取用耗竭后在人类有限的生命时间内是不能再次形成的，因而被视为不可再生资源，或不可更新资源，如各种金属、非金属矿产，以及煤和石油等；另一类自然资源如大气、水、风、太阳能以及生物资源等，是随着地球形成及其运动而存在的，基本上是持续稳定产生的，有可能被人类反复利用，所以被视为可再生资源或可更新资源。

按照矿产的基本属性可以把矿产分为无机矿产和有机矿产两类，前者如铁、铜、金、银、铝、镁、钛等，绝大部分为固体矿产；后者如煤、石油和天然气，其中流体（液体和气体）矿产占相当比例，当然一部分油气也可能是无机成因的。还可以从矿产可利用的特性划分为利用其物质组分的矿产和利用其物理化学性质的矿产（程裕淇，1982）。前者构成现代矿产中的绝大部分，在整个矿产的产值中占主要比例，如铁、铜、铝、煤、石油、硫、磷等，这类矿产除了以自然元素产出的几种矿产外，一般都需经过冶炼或提取才能为人类所利用；后者如云母、压电石英、石棉、宝（玉）石、耐火材料、装饰材料等，也包括现代高新技

术工业所利用的具有特殊性能的矿产，就目前所知，这类矿产绝大部分为非金属矿产。随着科学技术和现代工业的发展，预期还将增加不少新的矿产种类，包括原有矿产新用途的发现（如山西吸附型稀有稀土铝土矿）和含有新材料在内的新矿种的新发现（如华南离子吸附型稀土矿）。按矿产工业用途所进行的分类是较为流行的分类，我国目前采用的矿产工业分类如表 051 - 1 所示，

表 051 - 1　　矿产工业分类

金属矿产	非金属矿产	能源矿产
(1)黑色金属 (2)有色金属(包括特种金属和轻金属) (3)贵金属 (4)稀有金属 (5)稀土金属 (6)稀散金属 (7)放射性金属	(1)冶金辅助原料(包括熔剂、耐火材料和陶瓷) (2)化工原料(含农用原料) (3)宝(玉)石(含工艺石料) (4)建筑材料(含技术矿物原料)	(1)石油与天然气 (2)煤及煤层气 (3)地热 (4)铀矿

表中的黑色金属（铁合金金属）指能提炼铁、锰、铬、钛、钒等钢铁工业所需原料的矿产资源；有色金属（非铁合金金属）指能提炼铜、铅、锌、铝、镁、镍、钴、钨、锡、钼、铋、汞、锑等金属的矿产资源；贵金属指能提取金、银、铂及铂族金属钌、铑、钯、锇、铱的矿产资源；稀有金属指能提取锂、铷、铯、铍、铌、钽、锆、铪、锶的矿产资源；稀土金属指能提取 LREE（轻稀土）和 HREE（重稀土）及钪金属的矿产资源；稀散元素指能提取镓、锗、铟、铊、铼、镉、硒、碲元素的矿产资源；放射性矿产指铀、钍、镭。第一颗原子弹爆炸所用的铀，就是从刚果（今扎伊尔）一个矿山的尾矿（废渣）中提取的。非金属矿产主要指耐火材料和熔剂，前者如耐火粘土、蓝晶石、夕线石、红柱石、叶蜡石、硅石、菱镁矿和石墨等，此外白云石、橄榄石、



铬铁矿、锆石、膨润土也广泛用于耐火材料工业；熔剂主要指石灰岩和萤石。化工原料主要指化肥原料磷、硫、钾以及明矾石（提取钾）、蛇纹岩（钙镁磷肥）；无机化工原料主要指硼、芒硝、天然碱、重晶石及钠硝石等；化工灰岩主要指制碱灰岩和电石灰岩。宝（玉）石主要指金刚石、刚玉、绿柱石、贵蛋白石、金绿宝石、电气石、托帕石、黝帘石、尖晶石、石榴子石、橄榄石、石英、锂辉石、锆石、长石。玉石主要指翡翠、软玉、鸡血石、紫硅碱钙石、绿松石、青金石和蛇纹石等。建筑材料主要指水泥原料、粘合材料、饰面石材、玻璃原料、陶瓷原料以及轻质隔音隔热绝缘耐蚀材料等。能源矿产包括石油与天然气、煤及煤层气，以及地热和铀矿。蕴藏在地下的地热，理论上讲拥有的能量是超过化石燃料的。地热以水为媒介可以不断取用，是属于可再生资源这一类的，但目前开发出来的能量甚微。铀矿作为核能是20世纪30年代在实现了^{235}U在中子轰击下的裂变反应后开始的，40年代美国爆炸了第一颗原子弹，显示了以铀为原料的核裂变所产生的巨大能量，50年代苏联建成了世界上第一座核电站，至90年代用铀作燃料的核电站的发电量已占世界总电力的1/6以上。可知：矿产资源是制约一个国家经济和社会发展的重要因素之一。目前我国社会生产所需80%左右的原材料和约96%的能源都来自矿产资源。国际上，所谓发达国家也都是依靠大量消耗全球矿产资源而发达的。据统计，发达国家人口约占全世界人口的1/4，但却消耗了当时占全球80%的能源和矿产资源才完成工业化而成为发达国家的。因此，包括矿产资源在内的全球自然资源，已不再是一种自然物，而是具有经济、政治和战略意义的社会财富了，矿产资源成为各个国家或集团占有、交换和争夺的对象。人类历史上的许多战争也都是争夺资源的战争，至今，资源特别是石油资源也还是国际上引起纷争的一个重要因素。

052 矿床、矿体与矿石

矿床是由不同地质作用形成的、有开采利用价值的有用矿物聚集体。有用矿物已经发生明显矿化富集，但还不具备开采价值的矿物集合体叫矿胎或称矿化岩石。矿胎发生的地点叫矿点，矿点具有开采价值时叫矿床，准备或正在开采的矿床叫矿区，一组成因相同、地质特征相似的矿床的分布范围叫矿田。

一般认为，地壳岩石中存在着人类所需要的各种元素，但含有这种元素的大多数岩石并不能用来提炼出人类所需要的各种元素。这是因为元素在岩石中的含量太低，矿质处于分散状态，难以进行开采提炼或开采提炼所得在经济上不合算。因此必须要寻找出一种岩石，这种岩石中的有用元素普遍能富集到这样的程度，即将它或它们开采或提炼出来后所创造的价值比不开采提炼所付出的费用要高得多[①]，只有这种岩石才具有经济价值。这种具有市场经济价值的岩石即岩石中有用元素丰度比地壳相应元素丰度要高得多的岩石才能称之为前述的矿床。不同元素要成为矿床，其富集程度差别很大。有的只需该元素丰度的几倍就足以成为矿床，有的则需要浓集到几百，甚至十万倍才能成为矿床（表052－1）。如此则地壳中的矿床不仅是十分特殊的岩石，而且数量十分有限，在一定历史时期，如果科学技术没有取得突破性的进步，则客观上即存在着地球矿床被消耗殆尽的问题。矿床的这种特性决定了它必须具有一定的或较高的元素（或氧化物）含量（质量指标）和（或）一定的、较大的产出规模（数量要求）。这种具有足够数量和质量，并具有开采利用价值的地质体即矿床的矿体。矿体周围无开采利用价值的岩石是矿体的围岩，矿体与围

---

① 特殊情况下，比如非常时期，着眼于国家社会总体利益，也可以开采不够理想的矿物集合体。

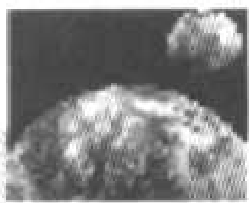
岩的界线有的清楚截然、边界明确，称为有形矿体；有的渐变过渡，需根据采样分析所查定的矿体边界品位加以确定，也就是说，实际上难以辨别其宏观边界，称为无形矿体。流体矿产的分布范围常有变化，因而没有固定的矿体形态。从矿体开采出来，从中可提取有用组分（元素、化合物或矿物）的矿物集合体称矿石。不同成矿作用形成的矿石具有不同的矿石提炼属性（品位），矿石的这种提炼属性是随着科学技术的进步发展变化的，以铜矿为例，19世纪含铜高于5%的矿石才有开采价值，而20世纪已降到0.4%，也就是说，19世纪对铜矿石的要求比20世纪高12~13倍。

表052-1　　某些元素成矿富集系数表

元素	地壳丰度（%）	富集系数	元素	地壳丰度（%）	富集系数	元素	地壳丰度（%）	富集系数
Al	8.0	3~4	Ni	0.007 2	150	Pb	0.0001	2000
Fe	5.8	5~10	Zn	0.008 2	200	Au	0.000 000 2	4000
Cu	0.0058	80~100	U	0.000 16	1200	Hg	0.000 002	100 000

注：元素富集系数=矿床中元素丰度/地壳中元素丰度。

由于矿体是具有实质性物质内容的地质体，所以依据其产出的三度空间可以将矿体（指固体矿产）划分为三类，即等轴状、板状和柱状（图052-1）。矿体等轴状指三度空间大致呈均衡延伸的矿体，一般是由岩浆分凝作用、充填交代作用和风化淋滤堆积等方式所形成的；板状矿体指在两个方向上（长度、宽度）延伸较大，而另一个方向（厚度）上延伸较小的矿体，典型代表为矿层或矿脉。矿层在沉积矿床和沉积变质矿床中最为常见，如铁矿层、锰矿层、磷块岩及铝土矿矿层等。矿脉是产于各种岩石裂隙中的板状矿体，是由含矿物质沿着围岩裂隙充填而成的，属于典型的后生矿体。矿脉多数呈倾斜状，倾斜矿脉上面的围岩称上



一向延长（柱状）	二向延长（板状）	三向延长（等轴状）
柱状：南非穆依赫克铂铬矿	矿脉（后生）：层状矿脉；切割矿脉	矿瘤 矿巢（平面图）
筒状：南非金伯利岩矿筒	矿脉（同生）	矿囊（剖面图）
管状：（美国加利福尼亚州金矿的管状矿体）M 21 45 75 105	复杂的二向延长矿脉：羽毛状矿脉；鞍状矿脉；瓜藤状矿脉；网脉状矿脉；马尾丝状矿脉；梯状矿脉；须根状矿脉；雁行状矿脉	矿袋（底面图）
		三向至二向延长过渡的矿体：透镜状矿体；扁豆状矿体

图 052－1　矿体形态图

盘，下面的围岩称下盘。柱状矿体指一个方向延伸很长（垂深可达 100m 以上）另外两个方向延伸很短（常为圆形或椭圆形）的矿体，主要是由火山岩浆爆发作用所形成的。产于火山口（破火山口）中的角砾矿筒是典型的柱状矿体，如南非含金刚石的金伯

利岩筒，它是深达700m以上的火山颈。含金刚石的矿筒有时亦称矿管。

矿体空间位置的产状要素，一般用走向、倾向和倾角表示。对于柱状和透镜状矿体还要测定它们的侧伏角和倾伏角。侧伏角是矿体最大延伸方向与矿体走向线之间的夹角，倾伏角是矿体最大延伸方向与其水平投影线之间的夹角。矿体产状，主要是指矿脉的产状经常有膨胀、狭缩、分支、复合、尖灭、再现等复杂变化。在矿体形成后如遭受后期构造变动、岩浆扰动或风化作用时，矿体产状还会受到改造，形成更加复杂的产状，如弯曲、错断、破碎、移位等。

矿体既可出露于地表（地表矿体），也可隐伏于地下（隐伏矿体）。隐伏矿体又可分为埋藏矿体和盲矿体，前者指矿体生成后曾经在地表出露过，以后又被后来的沉积物、火山岩以及土壤层等所覆盖；后者指埋藏在地下基岩中，即形成后从未出露过地表的矿体。盲矿及盲矿体的勘查评价是21世纪矿床地质学的重要课题。

53 成矿作用与矿床成因

在地球演化过程中，使分散存在的有用物质（元素、化合物或矿物）聚集而形成矿床的各种地质作用称成矿作用。成矿作用是复杂多样的，基于目前的研究程度，按成矿地质环境、能量来源和成矿作用性质将其划分为内生成矿作用、外生成矿作用和变质成矿作用三大类，并相应地将矿床区分为内生矿床、外生矿床和变质矿床三大类。

应当指出的是，这三大成矿作用是相互联系的。除了从地幔上升的岩浆直接形成的内生矿床外，许多内生气化热液矿床常与沉降到岩石圈深处的各种岩石或沉积矿床相联系。从地表渗透到地壳深处的地下水可直接参与内生热液成矿作用。对于变质成矿



作用来说三者更是联系紧密。因此有关成矿作用及矿床成因的划分目前尚没有统一的认识。

1. 内生成矿作用指由地球内部能量，包括热能、动能、化学能等所导致形成矿床的各种地质作用。除喷出地表的火山成矿作用及火山成因矿床外，其他各种内生成矿作用都是在地球（主要是地壳）不同深度，在较高温度和较大压力下进行的。内生成矿作用主要包括岩浆成矿作用和气化热液成矿作用，以及伟晶成矿作用和接触交代成矿作用。

岩浆成矿作用：是在岩浆结晶和分异过程中有用组分富集成矿的作用。由此所形成的矿床有三类：早期岩浆矿床、晚期岩浆矿床和岩浆熔离矿床。早期岩浆矿床的代表是金刚石矿床、铂族元素矿床以及铬铁矿床。世界上最大的铬矿产在南非布什维尔德杂岩中，晚期岩浆矿床的代表是钒钛磁铁矿床，我国四川攀枝花铁矿属此类矿床，而产于我国甘肃金川的铜镍硫化物矿床则属岩浆熔离矿床。

气化热液成矿作用：是各种来源的气化热液在其活动过程（包括与围岩的相互作用过程）中，使有用组分富集成矿的作用，由此作用形成的矿床即气化热液矿床。理论上讲气态溶液形成气化矿床，液态溶液形成热液矿床，然而由于地壳中的温度和压力都比较大，气态和液态两种溶液之间的差别比较小，在一些矿床的形成过程中两种溶液都在起作用，所以气化矿床与热液矿床不易区分，常统称为气化热液矿床。气化热液矿床种类很多，经济价值也较大，是 Cu、Pb、Zn、Au、Ag、Hg、Sb、Sn、W、Bi、Mo、Nb、Ta、Fe、Co、稀土元素及稀散元素 Cd、Ga、In、Ge、Re、Se、Te、Tl 以及重晶石、萤石、菱镁矿和硫铁矿等矿产的重要来源。

接触交代成矿作用：在岩浆岩侵入体与围岩接触带，主要通过气水溶液交代作用而使成矿物质富集的作用，由此形成的矿床

叫接触交代矿床，也称夕卡岩矿床。夕卡岩矿床经济价值较大，是 Fe、Cu、W、Sn、Mo、Bi、Pb、Zn、Be、Co 等金属矿产以及硫、硼等非金属矿产的重要来源。此外夕卡岩矿床中还含有大量可综合利用的其他微量元素。

伟晶成矿作用：指富含挥发组分的熔浆，经过结晶分异或气液交代，使有用组分聚集成矿的作用，这种作用形成伟晶岩矿床。伟晶岩矿床往往是指花岗伟晶岩矿床，可分为4类，即简单伟晶岩矿脉（钾长石及石英），重结晶伟晶岩矿脉（白云母、钾长石及石英），交代伟晶岩矿脉（水晶、萤石、宝石及稀有稀土矿物）及去硅伟晶岩矿脉（刚玉及蓝宝石）。

2. 外生成矿作用指发生在地壳表层的成矿作用，主要指在太阳能并有部分生物能、化学能的影响下，在岩石圈、水圈、大气圈、生物圈的相互作用过程中，使有用元素发生迁移聚集而导致矿床形成的成矿作用。外生成矿是在地表的温度和压力下进行的，主要包括风化成矿作用和沉积成矿作用。

沉积成矿作用：地表的成矿物质（岩石风化产物、火山喷出物、生物有机质等）经过沉积分异（机械的、生物的、化学的）而集中形成矿床的作用。由沉积成矿作用即成矿物质被水或风、冰川、生物搬运到水体内沉积聚集而形成的矿床叫沉积矿床。依成因可分4类：(1) 机械沉积矿床，如砂矿，以金刚石砂矿经济意义较大。(2) 蒸发沉积矿床（盐类矿床），盐类矿床有固体和卤水之分。固体者依形成时代又可分为现代盐湖沉积（如天然碱、石盐、芒硝、硼、锂及钾盐）和古代盐湖两类。(3) 胶体化学沉积矿床，以铁、锰矿床为最重要。(4) 生物－化学沉积矿床，以沉积磷块岩及沉积硫矿床为代表。

风化成矿作用：指地表岩石（或矿石）经风化作用，使有用物质在原地或准原地聚集成矿的作用，由这种作用形成的矿床称风化矿床。

3. 变质成矿作用指在接触变质和区域变质过程中所发生的成矿作用，或使原有矿床发生变质改造的作用，其所形成的矿床称变质矿床。

054 矿床成矿系列与矿床模式

矿床成矿系列和矿床模式都是现代矿床学的重要学术成就。矿床成矿系列是一个四维空间中矿床成矿整体，而矿床模式则是同一类矿床模式化的标准样式。

成矿系列：是由我国已故前地质矿产部总工程师程裕淇等于20世纪70年代所提出的矿床学新概念。含义是在一定地质历史发展阶段所形成的地质构造单元内，与一定地质成矿作用有关，在一定的地质构造部位形成的不同矿种、不同类型，且有成因联系的矿床组合。换句话说，成矿系列是指四维空间中具有内在联系的矿床自然组合，即一个成矿整体或成矿体系。矿床成矿系列从高到低包括7个层次（陈毓川，1994）。

1. 矿床成矿系列组合：这是成矿系列中的最高层次，是与沉积作用、岩浆作用、变质作用分别相应的成矿作用，是不同地质时期与不同地质构造单元中所形成的各类矿床成矿系列。这些矿床成矿系列都归之于本地质作用的矿床成矿系列组合，计有岩浆成矿系列组合、沉积成矿系列组合和变质成矿系列组合三大类。

2. 矿床成矿系列类型：某些矿床成矿系列形成于不同地质时代、不同地质构造单元，但具有相似的地质环境、相似的成矿特征、类似的矿床组合，同时又具有各自的时代及地区特点，因此可以把它们归为同一类型，作为矿床成矿系列的第二层次。例如在陆内或大陆边缘构造褶皱带，与壳源重熔型花岗岩有关的W、Sn等有色金属（稀土）矿床成矿系列，在我国桂北于元古宙（雪峰期）形成，在欧洲（英国、捷克）及中亚等地则在早古

生代（海西期）形成，而更多的矿床则形成于中新生代（燕山—喜马拉雅山期），如我国南岭、俄罗斯远东地区等。这些不同时代形成的相类似的矿床成矿系列可归属于一个矿床成矿系列类型。

3. 矿床成矿系列：是指在一定地质历史发展阶段，所形成的地质构造单元内，在一定地质成矿作用下，于不同地质构造部位形成的不同矿种、不同类型但又有成因联系的矿床组合，如与中酸性浅成侵入活动有关的矿床成矿系列。

4. 矿床成矿亚系列：在矿床成矿系列范围内的次级构造单元中，具有不同成矿阶段，但又具有成因联系和明显共性的矿床组合。在一个矿床成矿系列中可不分出亚系列，也可分出若干个亚系列。

5. 矿床式（矿床类型）：是指矿床成矿系列或亚系列中具有代表性的矿田或矿床。这些矿田或矿床是具有相似的成矿地质条件、矿床地质特征、成矿元素组合和矿床成因的同类矿床。可以矿床组中的代表矿床命名。

6. 矿床：是矿床成矿系列的基本组成单位，是矿床系列的研究基础。

7. 矿床成因类型：是矿床形成的成因类别。矿床可以是一种成因，也可以是多种成因。不同成因矿床可以构成矿床的不同部分，也可叠加在一起形成叠生矿床。产于不同部位的各类矿床，其规模相差悬殊。

目前在我国的一些重要成矿区（带）已建立了一批矿床成矿系列及亚系列。初步认为，我国存在元古宙、早古生代（海西期）和侏罗—白垩纪（燕山期）三个成矿高峰期。元古宙矿床成矿系列多分布在太古宙陆核边缘，海西期和燕山期矿床成矿系列多形成于洲际构造成矿带（中亚—东亚带、特提斯带和滨西太平洋成矿带）。矿床成矿系列成矿元素组合的演化趋势（陈毓川，

1994）为：太古宙的 Fe－Cu－Au（Zn）→元古宙的 Fe－Cu－Ni－Co－Pt－Nb－REE－Pb－Zn－Ag→加里东期的 Cu－Pb－Zn－Fe－Cr－金刚石→海西（印支）期的 Cu－Mo－Ni－Co－Pt－Pb－Zn－Ag－Au→燕山（喜马拉雅山）期的 Su－W－Mo－Cu－Pb－Zn－Sb－Au－As－Hg－U－Nb－Ta－REE－Cr－Fe；同时还认为，我国存在 4 大成矿域（或带），即中亚—东亚域、华北（扬子）前寒武地块域及特提斯带、秦（岭）祁（连）昆仑带和滨西太平洋带。

矿床模式：是一组相似（或同一类型）矿床地质特征的综合表征，是对一组或一类矿床的模式化表述，是通过对同一类型每一个矿床地质特征的系列整理，归纳出具有一定理性认识的、反映该类型矿床共性的标准样式即矿床模式，它可为矿床地质工作者提供辨认该类型矿床全貌的矿床资料。矿床模式的概念最早是由 V.Clark（1962）提出的，至 20 世纪 70 年代演变为与矿床类型、地质环境和成矿特征相结合的标准形式。

根据矿床模式的上述含义和国内外研究现状，我国于 20 世纪 90 年代完成了中国矿床模式的建模工作，在划分出 4 个构造成矿域、27 种成矿环境的基础上建立了 92 个矿床模式（裴荣富等，1995）。4 个构造成矿域是：前寒武纪构造成矿域、古亚洲构造成矿域、特提斯—喜马拉雅构造成矿域及滨西太平洋构造成矿域。前寒武纪构造成矿域是我国最古老的构造成矿域，以克拉通断隆、裂谷（裂陷槽）和古陆缘凹陷的成矿环境为特征，矿床主岩岩石组合为以变火山—沉积岩为主，矿种以 Fe－Au－Cu－Ni－Pb－Zn 和 Fe－Nb－REE，以及硼镁铁矿—滑石—菱镁矿为特色；古亚洲和特提斯—喜马拉雅构造成矿域，分别是古生代以来我国北方和南方的两大构造成矿域，它们都同样发育有洋壳的弧、沟、盆、缝合带，以及与其毗邻的陆内盆地等，矿床主岩岩石组合繁多，矿种亦相对复杂；滨西太平洋构造成矿域是中新生

代以来在我国东部特别发育的构造成矿域，它是叠加在前寒武纪和古亚洲构造成矿域之上的，矿床主岩岩石组分以重熔—同熔中浅成花岗岩及火山—侵入岩类为主，以 W - Sn - Pb - Zn - Hg - Sb - U - REE - RME 为特色矿种的构造成矿域。27 种成矿环境及 92 个矿床模式都是截至 20 世纪 90 年代已知的 425 个典型矿床成矿环境及矿床组合模式化的归纳与概括，内容比较庞杂，在此从略。

065 超大型矿床

超大型矿床按照涂光炽教授（1994）的定义是，拥有国际或国内惯例同（组）类大型矿床储量 5 倍以上的矿床即为超大型矿床。就目前所知，超大型矿床的分布（产出）形式主要有两类：1. 呈孤立的点状分布（点式分布），不只是周边无此类矿床，有的甚至全球也无此类矿床，通俗的说法是（或几乎是）“只此一家，别无分店”，如我国白云鄂博 REE - Nb - Fe 矿床、澳大利亚的奥林匹克坝 Cu - U - Au 矿床。2. 呈面状或线状分布，即同一类型矿床的大、中、小型矿床分布较广，而超大型矿床则在成因上和时、空分布上与大、中、小矿床有密切联系，只不过它是其中的最大者，其规模达到了超大型矿床的规模罢了。这种分布也有学者称为首领式分布（何知礼，1994）。实例是斑岩铜矿[①] 和密西西比河谷式 Pb - Zn 矿[②]。斑岩铜矿在我国具有超大型规模者有西藏玉龙、江西铜厂和富家坞等矿床，而大、中、小型斑岩

---

① 全球铜矿中最重要的矿床类型之一，因成矿作用主要与浅成或超浅成斑岩有关，故称斑岩铜矿。

② 产于美国密西西比河中上游的层状Pb - Zn矿床，是美国最大的 Pb - Zn 矿产区。矿体呈巨厚层状，主要含矿岩石为石灰岩和白云岩，矿区附近无明显与之有关的火成岩分布，属碳酸盐岩层控 Pb - Zn 矿床。

铜矿则遍布于环太平洋大陆边缘构造带（特别是南北美洲太平洋沿岸）及阿尔卑斯—喜马拉雅造山带。密西西比河谷式 Pb - Zn 矿的超大型矿床较少，在我国仅广东凡口一处，但大、中、小型矿床却分布甚广，仅我国滇、黔、川一带就达数十处之多，很明显，这种分布具“面型”或“线型”特征。通俗的说法是这类超大型矿床的“徒子徒孙”们较多。此外涂光炽教授还认为，在上述两类超大型矿床之间有过渡类型存在。含义是，例如与燕山期花岗岩有关的湖南柿竹园 W - Sn - Bi - Mo - Be 矿床，它除与我国南方许多 W - Sn - （Mo）矿床的产出形式及分布特点相一致外，还有更独特的一面，那就是除 W - Sn 为超大型矿床外，Bi 也达超大型矿床规模，柿竹园可能是目前世界上惟一 W - Sn - Bi 都达超大型储量的矿床。另外柿竹园的矿化类型齐全，既有夕卡岩型，又有云英岩型，还有网脉带型。其成矿经历了伟晶岩期→夕卡岩期→云英岩期→脉状夕卡岩期→硫化物期等连续矿化的发展过程，这些特点使它有别于同类超大型 W - Sn - （Mo）矿床，而属于另类，即“独此一家”的矿床类型。

关于超大型矿床的矿化类型，很明显，并非所有矿化类型都能形成超大型矿床，也就是说，某一矿种对其可能出现的超大型矿床在类型上是有选择性的，尽管某些其他类型也可以形成有重要工业价值的矿床。就目前所知，Cu、Mo 矿的超大型矿床主要是斑岩型，Sn 矿床是锡石硫化物型，Hg、Sb 多为层控型，Pb - Zn 矿也主要是层控型（SEDEX 型和 MVT 型）[①]，这两类超大型矿床的形成与分布——层控型和斑岩型具全球性普遍意义。但也有不具全球普遍意义的“线型”或“面型”超大型矿床，主要是金矿，从类型分布上看，金矿具有较强的区域性色彩，此与淘金热中金矿品位要求越来越低而矿床规模并未相应加大有关，因此

① SEDEX 即热水沉积型（或沉积喷流型），MVT 即密西西比河谷型。

Au矿是目前世界上发现最多的超大型矿床的矿种，其次是Cu、Pb、Zn以及U（不整合脉型U矿）和稀有金属矿床，也有Cr矿和Sn矿。它们大多是在已知矿带、矿区或矿田范围内，甚至是在矿床深部或旁侧发现的。

超大型矿床的形成常具有多成因、多物源、多期次成矿叠加或改造的特点。矿床有用元素较多，有源源不断的矿液供应，比如SEDEX超大型矿床的热水沉积作用，有提供矿液不断活动的“同生构造”和良好的储矿空间等。超大型矿床的探寻与研究可解决21世纪矿产资源短缺的困境，提高传统矿床理论水平。

056 层控矿床

层控矿床是指产于一定地层中，并受一定地层层位限制的矿床。有狭义和广义两种含义：狭义指由沉积或火山—沉积作用初步形成的矿胚或矿源层，后经改造富集或再造叠加而形成的矿床；广义的则指不管矿床成因如何，受地层或层状岩石控制的矿床即层控矿床，因此层控矿床并不一定是层状矿床。限定层控矿床的地层单元一般是组和统，但有时也扩大到群（或建造）。层控矿床属多因复成矿床，它不代表任一独立的矿床成因系列，虽如此，并不影响以矿床成因为主导对其进行分类。我国矿床学家胡受奚（1983）、徐克勤（1993）等对层控矿床的分类如下。

1. 同生层控矿床：矿床形成于沉积—成岩过程中，明显受水的深浅和微地貌控制，与原生沉积环境关系密切，如宣龙式铁矿就是以地层为界限的层控矿床，也是严格的时控矿床，与萨布哈（Sabkha）① 盐滩有关的铜、铅、锌矿床也属于同生（沉积—成岩型）层控矿床。

---

① Sabkha即潮上带环境，是干旱或半干旱气候条件下在障壁海岸形成的盐坪。

2. 后生层控矿床：指在后生热液成矿作用之前矿体所在部位并不存在同生矿床。如湖南瑶岗仙夕卡岩钨矿，虽然其矿体严格受中泥盆统棋子桥组条带状不纯灰岩（矿源层）所控制，但形成具有工业价值的矿床却是与燕山期花岗岩有联系。主要受中奥陶统马家沟组所控制的河北邯邢式铁矿，以及受中上泥盆统白云质灰岩和白云岩控制的湖南香花岭含铍条纹岩等也都属于后生层控矿床。

3. 叠生层控矿床：组成矿床的物质是由多种（至少为两种）成矿作用带来的，并在先前已存在的矿床中汇集、叠加而成。依成矿物质的主次关系可分为以同生为主、后生为辅（第一种），以后生为主、同生为辅（第二种）和二重成因叠生的层控矿床三种。第一种指矿床主体属于同生沉积成矿，后生热液作用或直接叠加（带入）新的成矿物质，或从附近矿源层中淋滤出成矿物质叠加在原矿体上，或将原矿层（矿体）中的成矿物质转移到附近裂隙或断裂带中作为“支矿体”成矿，典型矿床是贵州莱园子菱铁矿床。第二种指矿床主矿体为后生成矿作用所形成，若没有后生热液作用就不存在有工业矿床或只有小矿和贫矿，如南京栖霞山铅锌矿，其 Pb - Zn - （Ag）产出层位是丰度较高的地层，并普遍含锰和黄铁矿。大气降水沿断裂带向下渗流，产生岩溶角砾岩带。在燕山期构造—岩浆作用下，基底与浅部断裂联通，含矿地下热水沿断裂向上运移，萃取了碳酸盐盐层中的 Pb - Zn 组分，使含矿流体中的 Pb - Zn 达到一定浓度，并在适宜的构造部位，特别是断裂上盘和不整面联合处富集成矿。二重成因叠生层控矿床是同生沉积成因和后生热液成因相互叠加而成的矿床，这两部分矿床均具有独立的工业意义。典型例子为闻名中外的白云鄂博稀土—铁—铌矿床。

4. 沉积喷流（SEDEX）和密西西比河谷（MVT）型层控矿床：属于典型的多成因、多阶段叠生层控矿床（胡受奚等，

1983)。因世界级 Pb－Zn 矿都主要是由 SEDEX 和 MVT 型层控矿床所构成的（涂光炽，1994），故作为层控矿床的重要类型予以单独划出。在我国 SEDEX 型以秦岭厂坝和内蒙古东开庙（狼山式）Pb－Zn 矿为代表，MVT 型以广东凡口（凡口式）Pb－Zn 为代表。

5. 再造层控矿床：又称变质型层控矿床，主要指经区域变质改造的沉积或火山沉积矿床。典型矿床为前寒武纪沉积变质铁矿（鞍山式）中的富矿体，以及辽宁大石桥式滑石菱镁矿矿床。

057 与火山作用有关的矿床

与火山作用有关的矿床即火山成因矿床，亦即矿质主要来自火山岩浆的矿床。严格地讲，火山成矿作用并不是一种独立成矿作用，其矿床也并未构成独立的矿床类型，但因火山环境及火山构造的特殊性，以及火山矿床经济价值的重要性，把它们作为一个独立的成矿系统是必要的。

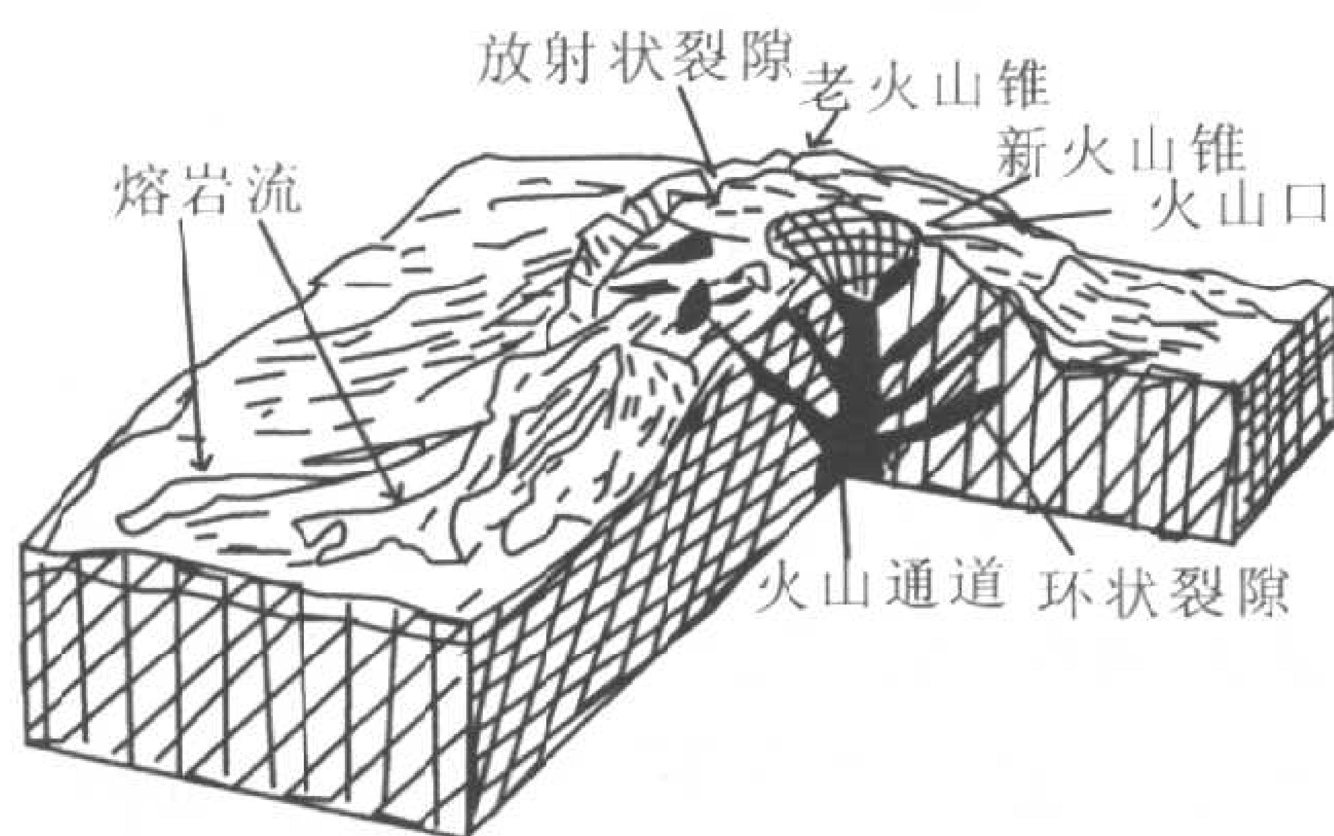


图 057－1　火山机构示意图

火山是地壳深处的高温（1000℃左右）岩浆（岩浆是地下一种富含挥发组分、成分复杂的高温熔融体）及其气体、碎屑从地壳中喷出而形成的，具有特殊的形态和机构（图 057－1）。火山按其喷发环境有陆相和海相火山活动两大类。火山成矿作用则直接或间接地与火山活动相联系，它包括火山岩浆矿床、火山—次火山气液矿床及火山沉积矿床。

1. 火山岩浆矿床：与产生火山岩—次火山岩的岩浆活动有关，主要形成于岩浆分异和结晶过程中，成矿物质的富集往往出

现于较深部位的岩浆（火山）通道或岩浆房中，但矿体赋存部位较浅。按成矿机制可分为5种类型：(1) 岩浆喷溢矿床，指火山岩浆分异出不混熔的矿浆侵至火山机构中或溢出地表而形成的矿床；(2) 喷溢—喷发矿床，以喷溢作用为主，次为喷发作用；(3) 岩浆爆发矿床，指产于火山爆发角砾岩筒中的矿床，典型矿例为与金伯利岩有关的金刚石矿床；(4) 次火山岩浆矿床，包括科马提岩（一种超基性喷出岩）系中的硫化镍矿床和与次基性—超基性侵入岩有关的铜镍硫化物矿床；(5) 火山岩浆交代矿床，矿床主要与碱性超基性—碳酸岩杂岩体岩浆活动有关，这里的碳酸岩是火成岩。

2. 火山—次火山热液矿床：指与火山岩浆活动有内在联系的气化热液矿床。与其有关的岩浆活动，按产状可分为喷出岩相、次火山岩相和火山浅成—中深成侵入体相。成矿作用是在火山气液的参与下或在火山热能的影响下发生的，重要的火山—次火山热液金属矿床，绝大多数是在火山喷发—喷溢阶段以后，在火山侵入活动期所形成的。主要有三种类型：火山喷气矿床、火山热液矿床和次火山热液矿床。

3. 火山沉积矿床：是介于内生矿床与外生矿床之间的过渡类型矿床，在矿床形成过程中既有火山喷气—热液参与，又有典型沉积层发生。主要有两类：一类是与陆相火山活动有关，并发生于陆相水域中的火山沉积矿床，即陆相火山喷发—沉积矿床和火山热泉沉积矿床；另一类是形成于海相火山活动环境中的块状硫化物矿床和变质火山沉积型铁矿床，后两种矿床均有较大经济价值。

158 风化作用与风化矿床

风化矿床是工业矿床的重要类型，是由原岩经风化作用所形成的。

风化矿床及风化壳的形成取决于两个因素：一是内因，主要是岩石及矿物种类，以及岩石矿物的化学成分和物理化学性质；二是外因，主要是气候、水文、大气、地貌以及生物作用等，这二者之中以源岩和气候最为重要，但最根本的还是源岩成分的不同。

源岩：即母岩，母岩分解时形成风化壳，也就是说，母岩的成分和性质直接影响到风化壳的发育程度和风化壳的最终产物。由于岩石和矿物的分解主要是通过溶解、氧化、水合、水解及碳酸盐化等作用进行的，所以水的溶解度、水化作用的强弱、氧的多少和 CO_2 在水中的含量都是风化作用的主要营力，并总是通过岩石及其矿物本身的解体而起作用的，所以岩石（矿物）的裂隙、矿物的共生关系及类质同像① 杂质，尤其是晶格构造和元素的存在形式等均影响岩石及矿物的风化作用强度。火成岩造岩矿物（包括变质成因矿物）风化顺序与造岩矿物在鲍温反应系列② 中的晶出顺序相反，即在早期高温和缺水条件下形成的矿物较晚期在较低温度多水条件下晶出的矿物更易于被风化。沉积岩的主要组成矿物是粘土矿物（高岭石、蒙脱石、伊利石等）、水云母、绿泥石、石英和碳酸盐岩矿物，其中高岭石、蒙脱石、绿泥石、伊利石及水云母等对风化环境的平衡关系变化较小，碳酸盐岩几乎在风化作用的所有条件下都倾向于溶解，石英颗粒则被保留下来，重矿物（金红石、锆石、钛铁矿等）是极难分解

① 指矿物结晶时，其晶体结构中本应由某种离子或原子占有的位置，部分地被介质中性质相近的其他离子或原子所取代，共同结晶成均一的单一相混合晶体而并不引起链性和晶体结构型式发生质变的现象。

② 鲍温反应系列即岩浆结晶过程中有规律产生的一系列矿物，有两个反应系列：①连续系列（Ca 长石→Ca - Na 长石→Na - Ca 长石→Na 长石）；②不连续系列（橄榄石→Mg 辉石→Mg - Ca 辉石→角闪石→黑云母）（箭头示晶出顺序）。

的，是几乎不受风化影响的矿物。

气候：反映气候特性的温度和雨量在风化壳剖面中起决定性作用。极地纬度区温度太低没有条件形成风化壳；在近极纬度的中等温度环境下生成胚胎状态的风化壳，此时某些硫化物、氯化物、硫酸盐分解，形成易溶化合物被淋滤，部分碱金属和碱土金属被带出；中纬度的气候条件形成较好的风化壳，相当多的碱金属和碱土金属被带出，某些氧化硅被带走；低纬度热带气候则形成最成熟的风化壳，从成熟风化壳中可带出全部或近于全部的碱金属、碱土金属和氧化硅。可知：母岩的分解程度和岩石风化成熟率是自极地向赤道逐渐增高的，温度（热量）是增高的重要因素之一。一般说来，温度每升高 10℃，化学反应速度可加快 2～2.5 倍。

降水量决定湿度。极地纬度区降雪湿度低，不利于风化壳的形成；低纬度区为沙漠气候低湿度，岩石中的水分沿毛细管上升到地表时导致碱土发育，并聚集形成氯化物、硫酸盐和其他易溶化合物的薄壳；中等雨量和经常不断降雨的中低纬度区可构成稳定的湿润条件，有利于形成风化壳；呈暴雨形式的丰富降雨量，地表径流迅速流过地面，不大可能促进基岩的化学风化。因此形成成熟风化壳及风化壳矿床的最佳气候条件是低纬度热带，是全年高气温和长时间不断湿润的地区。

由于大陆是漂移的，在地质尺度范围内，随着时间推移，气候明显更替。以近代气候为对比标尺，之前是低纬度气候条件的地区，则近代成了中纬度，如我国华北地区；也有之前是中高纬度气候条件的地区，现在成了中低纬度，如澳大利亚。因此近代气候条件不适宜于形成风化壳矿床的地区可能有古风化壳矿床存在，如华北 G 层铝土矿以及与其共（伴）生的风化壳稀有稀土元素矿床。

风化过程中元素的聚集和富集主要是元素遇到迁移环境物理

化学条件改变的缘故。这类骤然改变的环境好似一种障碍，在短距离内即可阻止元素继续迁移，这样的地段称为地球化学障。障是根据导致元素沉淀的主要因素划分的，有含氧障、含 H_2S 及不含 H_2S 的还原障、碱性障、酸性障、蒸发障、吸附障、硫酸盐障、碳酸盐障以及生物障等。发育良好的风化壳的垂直分带（自下而上）为水合作用带→淋滤作用带（或淋滤和终结水合作用带）→水解作用带→氧化作用带（氧化和终结水解作用带）。氧化作用带形成化学分解的最终产物，即铁、铝、锰、钛的氢氧化物。在风化作用强烈而彻底时，形成成熟风化壳，各中间过渡消失，全为氧化作用带，从而构成简单的风化壳。风化壳矿床，特别是大型—超大型风化壳矿床的形成均与成熟风化壳有关。

不同地质时代，不同源岩经受风化作用后常形成不同的风化壳矿床。如前所述，按时代可分为现代风化壳矿床和古（代）风化壳矿床，前者指第三纪或第四纪以来受近代气候影响形成的风化壳矿床，后者指前新生代形成的风化壳矿床。二者的区别除形成地质时代不同外，古风化壳矿床在形成后其上覆盖有不同时代的新地层，风化壳矿床经受了埋藏变质作用（如我国华北G层铝土矿）或区域变质作用（如俄罗斯库尔斯克铁矿）。按矿种可分为红土型[①]（钙红土型）铝土矿、红土型铁矿、锰矿、镍矿、钴矿，以及新近发现的红土型金矿及我国发现的现代（第三纪至现代）风化壳稀土元素矿床和古代（晚泥盆世—早石炭世）风化壳稀有稀土元素矿床。现代风化壳稀土元素矿床，也称离子吸附型稀土矿，简称离子型稀土矿，被誉为世界罕见的稀土宝藏，广泛分布于我国华南北纬28°以南广大地区，母岩主要为南岭花岗

① 岩石饱经化学风化作用，能迁移的元素均已移出，硅酸盐矿物亦被分解，因风化壳富含铁质故名。这类风化壳的厚度较大，主要分布于湿热气候区。

岩系列岩石。当风化作用发展到高岭土（多水高岭土）阶段，介质为弱酸性时，母岩（副矿物）释放出来的稀土元素呈阳离子状进入溶液，并被粘土矿物吸附富集成有工业价值的离子吸附型稀土矿。离子型稀土矿矿种齐全，既有铈族稀土（轻稀土），也有钇族稀土（重稀土），特别是钇族稀土矿，它的发现改变了世界上缺少重稀土的困难局面，解决了世界上80%以上对Y_2O_3的需求量。离子型稀土矿的稀土（REO）含量很低，在0.1%左右，但稀土元素以简单阳离子形式为粘土矿物所吸附，易选、易冶，所以不仅工业意义重大，而且经济效益也十分显著。古风化壳吸附型稀有稀土矿发现于20世纪90年代，容矿岩石为前述古风化壳型铝土矿。经对其所含稀有稀土元素赋存状态的研究，发现它们（稀有稀土元素）均不呈独立矿物存在，而是以纳米（主）和离子（次）状态被铝矿物和粘土矿物吸附富集成矿。除容矿岩石可作为中低铝硅比铝矿石开采利用外，纳米—离子吸附型REO（含量在0.1%以上）、Sc（含量在0.004%左右）及Nb（Nb_2O_5含量大于0.01%）亦可作为稀土稀有金属矿开采。由于我国是稀土资源大国，并不缺乏稀土资源，特别是轻稀土，所以单采单冶似无必要，但是由于稀土稀有元素是被富集吸附于铝矿物（一水硬铝石）之间的，这对发展我国硬水铝石型氧化铝工业，无论是工业意义、经济价值，还是环保效益都是十分重要的。

红土型金矿最早（1980）也是作为风化壳铝土矿金矿在澳大利亚布丁顿首先被发现的，Au的平均品位仅1.6×10^{-6}，但资源量很大，达96t。随后在巴西、泰国、印度、斐济以及越南、几内亚等地也都陆续发现了红土型金矿。我国第一座大型红土型金矿——湖北嘉鱼蛇尾山金矿发现于20世纪90年代初，嗣后又在北纬30°以南我国华南地区发现了众多的红土型金矿。据有关研究，金的赋存状态与吸附型稀土矿一样，亦是以超显微颗粒为铝土矿物及褐铁矿所吸附，属吸附型金矿，Au的平均含量虽然较

低，但同样易采、易冶，所以目前已构成一种黄金资源的重要类型，开发前景广阔。

159 一次能源的三大支柱——煤、油、气

人类对化石能源的利用有过三次大转变。整个 19 世纪为能源的“煤炭世纪”，之前的能源主要取自木材。从 20 世纪 20 年代开始世界能源结构发生第二次大转变，石油取代煤炭而居主导地位，被认为是“石油世纪”。第三次是目前正在出现的向多能源结构的过渡，这一转变还没有完成，而作为一次能源三大支柱的煤炭、石油和天然气在当今世界各国的生产和消费构成中依然占有相当比例，虽然发达国家已弃煤用油。

煤：煤由植物遗体堆积埋藏后经成煤作用而成。成煤作用有两大阶段，第一阶段是在地表常温常压下，由堆积在停滞水体中的植物遗体经泥炭化作用或腐泥化作用转变成泥炭或腐泥，这一阶段以生物化学降解作用为主；第二阶段是泥炭或腐泥被埋藏后，由于沉积盆地基底沉降至地下深部，经成岩作用转变成褐煤，当温度和压力再增高时，经变质作用转变成烟煤和无烟煤，这一转变过程即由泥炭或腐泥转变为褐煤→烟煤→无烟煤（超无烟煤）或腐泥转变为腐泥褐煤→腐泥烟煤→腐泥无烟煤（腐泥超无烟煤）的过程称煤化作用。煤化作用的成岩作用以压力为主，使煤炭压实、脱水、固结而转变为褐煤；煤化作用的变质作用是在以温度为主、压力为辅的条件下，使褐煤转变为烟煤、无烟煤以至超无烟煤。超无烟煤进一步变质即为半石墨和石墨。

煤在显微镜下可见到其中被石化了的植物木质纤维组织，木栓层、角质层、蜡质层、树脂、孢子、花粉、菌类、藻类（有机质）以及矿物质（粘土矿物、碳酸盐、硫化物、氧化物、磷酸盐、石英及重矿物）。煤中有机质是复杂的高分子有机化合物，主要由 C、H、O、N、S 等元素组成，其中 C、H、O 是主要成



分，三者占有机质总和的95%以上，因此煤是由多种有机物与无机物组成的非均质混合物，是一种有机岩。按堆积方式，有原地和异地煤之分；按成煤质料和原煤环境可分为腐殖煤（高等植物遗体煤）、腐殖腐泥煤（高等植物和低等植物遗体煤）、腐泥煤（藻类植物和浮游生物腐解煤）；按煤化程度可分为褐煤、烟煤、无烟煤及超无烟煤。

我国煤资源比较丰富，蕴藏量列世界第三位，但人均占有量并不多，仅相当于煤资源中等的国家。严重的问题是它不是洁净能源，其污染破坏贯穿于开采、运输、储存、利用及转化的全过程，特别是在我国，毋庸讳言，问题较多，隐患很大。

石油：又称原油，是赋存于地下岩石孔隙中以碳氢化合物为主要成分的液态可燃矿产。广义的石油通常指自然界中存在于地下以气态、液态和固态烃类化合物为主，并含少量杂质的混合物。杂质中有数量不等的液态和固态非烃化合物，并含多种微量元素。从地下开采出来的石油，没有经过提炼之前通称为原油，原油中的化学元素主要有C、H、O、N、S，其中C和H占95%～99%，其他元素O、N、S和微量元素占1%～5%。这些元素大多以化合物形态出现，分为两类：一类是由C、H组成的化合物（烃类化合物），如环烷烃、烷烃和芳烃，这是组成石油的基本化合物，占石油成分的97%～99%；另一类是含O、N、S的非烃化合物，如含氧的酚、含氮的卟啉、含硫的硫醇等。由于组成烃的C、H原子数目不同，使石油中含有多达3000种大大小小差别悬殊的烃分子，最简单的是甲烷（CH_4），分子越大沸点越高，分子小的（含1～4个碳原子）为气体，中间的（含5～16个碳原子）为液体，碳原子数大于16个的烃物质为固体，因此可以说石油是由大大小小的烃分子组成的极其复杂的混合物。采用现代化的先进技术可以将这一复杂的混合物催化裂解为成百上千种石化产品，如透明汽油、航空煤油、褐色柴油、多功能润滑



油、黑色沥青、石蜡、燃料油、石油溶剂、石油焦，以及塑料制品、合成纤维（锦纶、涤纶、腈纶、氯纶等）、合成橡胶、化肥等。石油及其化工产品在国民经济中发挥着重要作用。

天然气：有狭义和广义之分，广义的天然气是指蕴藏在地层中的烃和非烃气体的混合物，包括油田气、气田气、煤层气、泥火山气和生物生成气等；狭义的天然气通常多指油气田气，即以烃类为主的天然气，含有一定的非烃气体，但也有以非烃气体为主的气藏，如我国广东三水的 CO_2 气藏（CO_2 含量高达 99%），河北晋县 H_2S 气藏（H_2S 含量达 92%）。自然界中气体的生成作用十分广泛，有机质的降解和裂解作用、岩石的变质作用、岩浆作用、放射性作用以及热核反应等都可以生成气体，这就是说，在自然界很少有单一成因的气体单独聚集，而往往是不同成因气体的混合聚集体。

据能源专家预测，天然气作为煤和石油之后的第三大能源，其需求量每年以 20% ~ 30% 的速度增长，在 21 世纪将部分替代石油，成为全球最主要的能源之一。天然气的主要成分为 CH_4（甲烷）等烃类气体，此外还含有少量非烃类气体，如氨气、二氧化碳、氢气和硫化氢等。目前已发现和利用的天然气有油型气、气田气、煤层气、生物成因气、无机成因气、水合物气和深海水合物圈闭气，但在天然气产量中，主要还是气田气和油田气，煤层气（煤层甲烷）亦已正在开发。

天然气作为能源不需要重复加工就能够直接送往使用地区，质量稳定，燃烧均匀，基本不污染环境，是优质清洁的化石燃料。作为化工原料目前主要用于生产合成氨和甲醇。从我国一次性能源的构成看，煤炭的开发利用问题较多，应减少使用，谨慎使用，节约使用，优化使用；石油的增加将是有限的；而天然气则是比较丰富的。气田的建设和生产费用也低于油田，因此加强天然气的开发，实施油气并重，将是我国 21 世纪一次能源开发



的重要任务。

060 油气田的形成与分布

油气田的形成涉及油（气）的成因，目前学术界有三种成因观点，即油气无机成因说、油气有机成因说及油气成因二元论。无机成因论者认为，石油是自然界的无机物生成的；有机成因论者认为，石油是由自然界的有机物生成的；二元论认为有机及无机都可以形成油气。在有机成因论中又有早期成油和晚期成油之争，以及惟海相有机成因与陆相有机质亦能成油的不同认识。目前油气有机成因说，特别是油气有机成因晚期成油说得到绝大多数科学家的支持，在油气田的形成理论中占绝对优势地位。

油气有机成因学说认为，大量的生物，主要是海洋和湖泊中的浮游动植物、细菌、藻类及陆生高等植物，在它们死亡后，其有机质一部分腐烂分解气化变成 CO_2 逸散，另一部分和泥沙一起在凹陷盆地中沉积下来形成有机质。这之中有一种特殊的有机质——干酪根，它既不溶于酸碱，也不溶于水和有机溶剂，性能特别稳定，是一种高分子有机化合物，它赋存于生油层中，在特定的温度、压力、时间、催化剂等条件下转化为石油和天然气，是形成油气的源泉，故干酪根又称油母质。干酪根（有机质）的油气转化过程可分为四个阶段：1. 生物化学生气阶段（未成熟阶段）；2. 热催化生油气阶段（成熟阶段），国外习称“生油窗”，为主要的生油期；3. 热裂解生凝析气阶段（高成熟阶段）；4. 深层高温生气阶段（过熟阶段）。由于有机质生成的油气是分散的油气，只有经过地下运移——初次和二次运移才能形成工业规模的油气藏。油气藏是指在单一遮挡控制的圈闭中形成具有独立压力系统和统一的油—水（或气—水）界面的油气聚集，这个聚集油气的空间（或仓库）称为地质圈闭，简称圈闭。油气进入圈闭后不断集中而逐渐增多。由于油、气、水的密度不同，在圈闭内

进一步分成三个层次，即气上—油中—水下。至此石油从生成运移到进入圈闭富集和分异，完成了油气田形成的全过程。以圈闭而论，我国大庆油田属典型的构造圈闭，新疆克拉玛依则是以地层圈闭为主的油田，胜利牛庄油田属岩性圈闭油田，河北任丘油田属古潜山圈闭。

一个圈闭要想捕集油气，形成油气藏并保存至今成为有工业价值的勘查目标，并不是那么容易的，必须具备7个条件（李德生等，2002）：1. 有充足的油气供应，这是圈闭聚集油气藏的先决条件；2. 具备畅通的运移条件，包括运载层、断层及不整合面，或者是由三者构成的运移网络通道；3. 良好的储集层，孔隙发育的砂岩、砂砾岩及溶洞发育的碳酸盐岩是良好的储集层；4. 封闭条件好，盖层致密，渗透性差，分布广，厚度大和连续性好；5. 圈闭的规模（面积、幅度、容积等）及类型，背斜圈闭优于其他圈闭类型；6. 后期保存条件良好，圈闭聚集油气藏后，构造运动相对平静，此对油气藏的保存有利；7. 以上6大要素在时（间）空（间）上要有利配合，因为任何一个要素的缺乏对油气藏的形成和保存都有重要影响。这里要强调指出的是中国地质学家对石油地质理论，即陆相生油论的特殊贡献。过去的有机成因说认为，只有在海相沉积地层中才能生成石油（海相成油说），然而中国地质学家针对中国的石油地质实际及勘查研究，提出了“陆相生油”的科学理论，并首先在我国中新生代陆相沉积地层中发现了丰富的油气资源。例如松辽盆地的大庆油田，那里的湖相生油岩系，无论是有机物的数量，还是有机质转化为烃的条件都不亚于海相沉积环境。现在学者们普遍认为，沉积岩中的植物和动物，水生的和陆生的有机物质，都可以作为生油母质，陆相沉积环境与海相沉积环境一样，在温度等因素使有机质转化为烃的条件下都可以生成大量油气，二者之间除原始物质有某种程度的差别外，没有什么本质的差别，从而使我国石油地质

理论在世界石油地质理论中占有一定地位[①]。

全球油气资源的分布，按大地构造位置可划分为特提斯、太平洋、北方大陆和南方大陆四大含油气域。各含油气域面积占总面积的百分比为：特提斯占17%，太平洋占17%，北方（大陆）占28%，南方（大陆）占38%；油气资源/储量分布为：特提斯占68%，太平洋占5%，北方占23%，南方占4%。可知：特提斯盆地面积虽仅占全球陆地（陆架）面积的17%，但油气资源/储量却占68%。在全球160多个产工业油气流的盆地中，波斯湾(中东)、西西伯利亚、伏尔加—乌拉尔、马拉开波、墨西哥湾、锡尔特等6个大型盆地拥有的油气资源/储量占世界已发现的油气资源/储量的65%，其中4个盆地属特提斯。至20世纪末全球已发现石油资源/储量在10亿t以上，天然气资源/储量在1万亿m^3以上的特大油气田为43个，其中波斯湾盆地占20个。因此全球各地区石油产量分布极不均匀，产量最高的地区为中东(波斯湾)。

我国大陆可能的含油气盆地面积据测算约为390万km^2，已找到了400多个油田和100多个气田。

目前世界上大约有150多个国家在进行油气勘查，其中90多个国家有生产记录，年总产量在30亿t左右，以此开采速度(30亿t/a)计算，则70年后全球石油将被人类耗尽。石油一旦枯竭，将对世界能源构成产生重大影响，因为石油约占世界能源总需求量的40%。更令人担忧的是，石油枯竭后，数千种与国民经济和人民生活密切相关的石油化工产品也将随之消失，作为能源，可以通过开发核能、太阳能等再生能源予以接续，而作为

---

① 最近有学者指出，中国的陆相生油理论主要解决了3000m以浅的常规矿藏，但现在开采的石油已进入到4000m以下的矿藏，因此中国石油(包括天然气）地质理论还应继续再创新。

化工产品原料又有什么资源能替代呢?

061 地热资源与中国地热带

地球中的天然热能称地热能，而地热资源（简称地热）则仅指封闭在地球中距地表足够近的距离内，并可经济开采的那部分天然热能。目前，国际上以5000m以浅地壳中蕴藏的天然热能（14.2×10^{23}kJ）[①] 来评估全球地热资源。

地热资源依温度分为三类：高温地热资源，热储温度大于150℃；中温地热资源，热储温度小于150℃而大于90℃；低温地热资源，热储温度小于90℃。依地热资源的性质和赋存状态，可分为5种类型，即蒸汽型、热水型、地压型、热岩型和岩浆型，前两类统称为水热型地热资源，是当今开发利用的主要地热资源；后两类统称干热（岩）型地热资源，属于潜在地热资源；第三类，即地压型地热资源，虽然形成条件不太普遍（往往形成于含油盆地深部），但其热能巨大，除热能外，往往还含有甲烷之类的化学能和高压所致的机械能。

以上5种地热资源按其形成环境和热量传递方式可区分为两大地热系统：对流型地热系统和传导型地热系统。对流型地热系统又包括两类：1. 与新近浅成岩浆侵入活动有关，并出现在高孔隙率、高渗透率地质环境中的水热系统，其中产生了高温热水（液控型）和蒸汽（汽控型）热储（图061－1），多属高温水热系统；2. 与区域热流场有关，并出现在孔隙和裂隙介质中的中低温热水环流系统，与高温水热系统的主要区别是地下深处没有岩浆房或岩浆侵入体。热水的温度主要取决于区域地热场和足够的水量及循环深度。学者们的理论分析表明，对于一个由正常区域背景热流（60mW/m^{-2}）供热的热水或温泉，其循环深度至少

① 相当于5000亿t标煤的热量。

为3～4.0km，形成时间大约需要100 000a，传导型地热系统包括干热（岩）型（热岩型和岩浆型）和地压型。由于温度太高（650℃～1200℃），埋藏太深（大于3km），故其热能利用目前尚难以实现。即使正常中低温地热系统，由于其热能仅仅来自热传导，为获得100℃的温度，需要向地下钻几千米深的钻井才行，因此其经济效益较低。

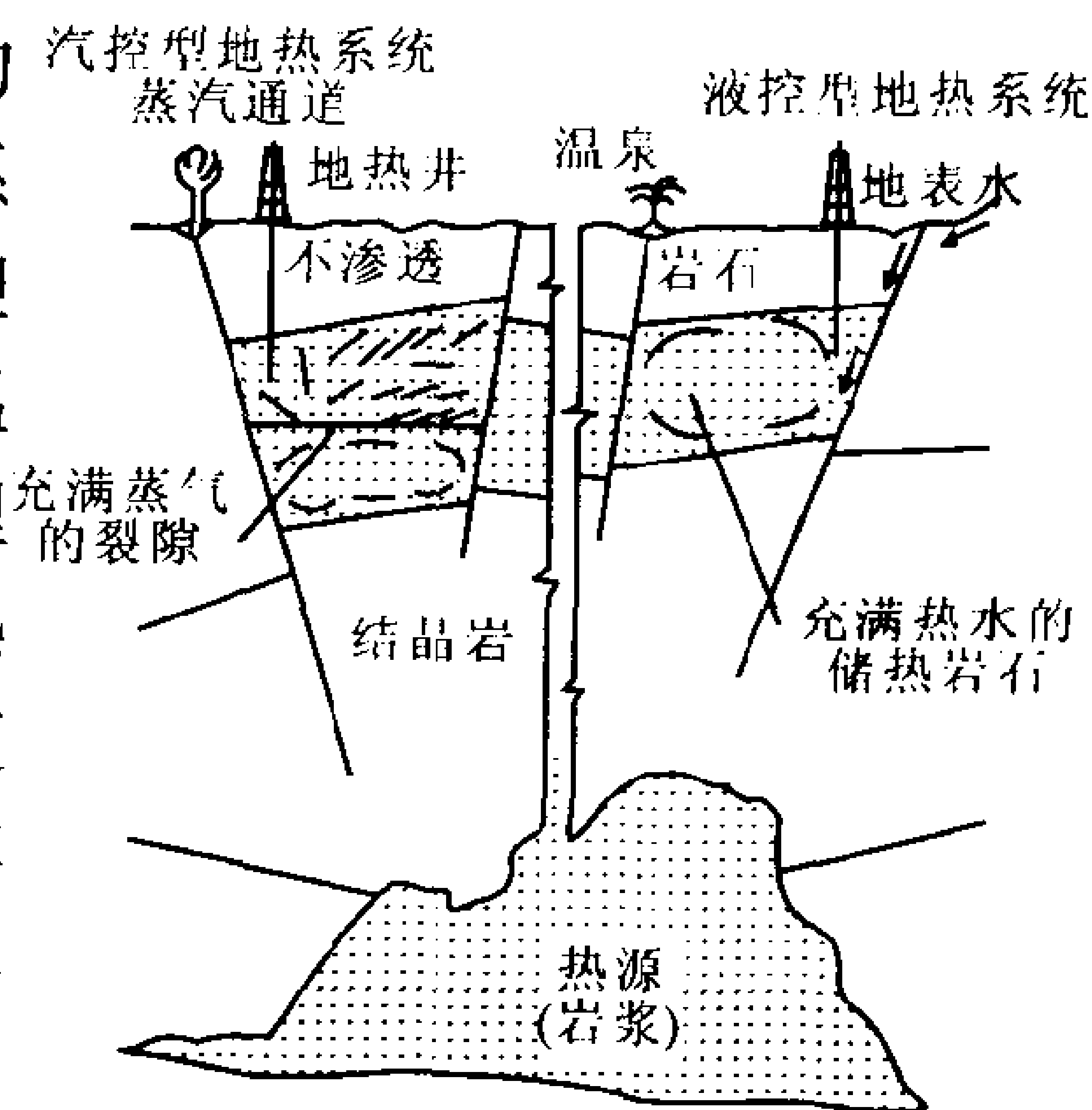


图061－1　高温水热系统示意图
（据汪集旸等，2001）

地热资源的开发利用，从世界上第一座地热电站（意大利拉德瑞罗）建成至今已有近百年的历史，但直到20世纪70年代才兴起世界性地热发电热潮。我国的地热勘查及规模开发利用，也始于20世纪70年代，首先是对我国东部的地热勘查，至今已勘查的地热田有：北京、天津、辽宁熊岳、河北怀来、山东招远、湖北英山、应城、安徽黄山、江西宜春、福建福州、漳州、广西象州、广东丰顺、丰良、汕头和阳江等；我国西部地热勘查虽起步较晚，但科学调查较早，也是始于20世纪70年代，先后对云南腾冲、西藏羊八井以及横断山脉进行了调查，通过调查不仅发现了150多处高温（大于150℃）水热系统，而且还促进了西藏羊八井地热田的开发。从地热调查和地热田的勘查结果看，我国是地热资源大国之一，总体上有4个地热带，即水热活动带（汪集旸等，2001），它是藏南—川西—滇西地热带、胶辽半岛地热带、东南沿海地热带及台湾地热带。

062 水资源与中国水资源问题

地球岩石圈内、地球表面、大气层中、生物体内，所有各种形态的水——海洋水、冰川水、湖泊水、沼泽水、河流水、地下水、土壤水、大气水和生物水，在全球形成一个完整的水系统——水圈。某一时刻储存于水圈中的水约为 $1.386\times10^{18}m^3$，其中约有 $1.338\times10^{18}m^3$ 储存于海洋中，占96.5%，其余 $4.8\times10^{16}m^3$ 的水储存于陆地各种水体中，占3.5%。在这3.5%中有 $3.503\times10^{16}m^3$（占陆地水储量的73%）为含盐量小于1g/L的淡水，在陆地淡水（占全球水储量的2.53%）中只有 $1.065\times10^{16}m^3$（占陆地淡水的30.4%）分布在湖泊、沼泽、河流、土壤以及地下600m以浅的含水层中，其余69.6%分布在两极冰山以及高山冰川和永久冻土层中而难以利用。

国际上通常以河流量来近似表示动态水资源量。根据水文测验资料，全球年平均径流总量为 $4.68\times10^{13}m^3$，其中河川径流量为 $4.45\times10^{13}m^3$，冰川径流量为 $2.3\times10^{12}m^3$，在河川径流中约有 $4.35\times10^{13}m^3$ 流入海洋，其余 $1.0\times10^{12}m^3$ 排入内陆湖。径流量的地区与人口分布并不相适应，适合人类居住和人类活动地区的年径流量为 $1.9\times10^{13}m^3$，占全球径流总量的40.6%。由于各大洲自然条件差别很大，降水量和径流量的地区分布很不均匀，以大洋洲各岛屿与南美洲比较丰富，欧洲、亚洲、北美洲中等，非洲较差。澳洲是水资源最贫乏的大陆。南极洲的降水量虽然较少，没有一条永久性河流，然而却以冰川形态储存了地球淡水总量的62%。

据20世纪90年代的统计，世界各国拥有水资源量的序次(前5位)依次为巴西、俄罗斯、加拿大、中国、美国或印度尼西亚（陈梦熊，2000)，中国和美国的水资源量大致相当。中国陆地总面积960万 km^2，地表径流量为2.26万亿 m^3，美国陆地

总面积937万km^2，地表径流量为2.39万亿m^3，美国用水量平均为5640亿m^3/a，中国的用水量平均为5192亿m^3/a，都是世界上用水量最多的国家，但美国人均用水量远远超过中国。从全球范围看，全世界年人均水资源量为7342m^3，这一数量级除加拿大（120 000m^3/a）、巴西、美国（10 000m^3/a左右）等少数几个水资源大国，以及北欧的挪威、瑞典、芬兰等国及沿赤道分布的若干岛国，由于雨量丰沛而人口较少能超过或达到这一指标外，世界上绝大多数国家，如亚洲的中国（2540m^3/2730m^3）、印度（1954m^3）、巴基斯坦（1858m^3）、日本（3600m^3），欧洲的英国（2730m^3）、德国（1172m^3）、意大利（2980m^3）、法国（4570m^3）、葡萄牙（2770m^3）、捷克（1900m^3）、保加利亚（2100m^3）等国均达不到上述人均水资源量指标，属于中等水资源国家。贫水国家主要集中在中东、中亚以及北非等地区，北非及西亚尤为严重，如沙特阿拉伯（124m^3）、以色列（299m^3）、土库曼斯坦（217m^3）等。如按年人均用水量（包括工农业用水量）统计，则世界上绝大多数国家介于200～600m^3之间，小于200m^3或大于600m^3的国家均为数不多。我国年人均用水量为452m^3，相当于多数中等用水量国家。然而我国农业用水量所占比例太大，约为发达国家的2～3倍，实际上并不合算，而工业，特别是生活用水所占比例又太小，远远低于中等用水量的发达国家，而生活用水又直接关系到人民健康，关系到可持续发展。

根据全国分省（市、自治区）统计汇总（刘昌明等，2000），我国水资源总量，年降水量为61 889×10^8m^3，地表水径流总量为27 115×10^8m^3，地下水总量为8 288×10^8m^3扣除两者的重复计算水量7 279×10^8m^3，则全国年水资源总量为28 124×10^8m^3（或28084.52亿m^3），即约2.8万亿m^3（陈梦熊，2000），相当于年平均降水量的45.4%。但是由于我国地域辽阔，有不同的纬度气候带，而水资源的分布又受地质条件控制，所以差异很大。

水资源的贫富差别基本上是一个相对概念，主要取决于资源量与用水量之间的关系。资源量主要用于对水资源的评价，有4个等级：水资源丰富，年人均水量大于3000m^3；水资源中等，3000～1000m^3/a；水资源不足，1000～500m^3/a；水资源贫乏，年人均水资源量小于500m^3。用水量必须符合经济合理、有益环境与高效用水的基本原则。

我国是水资源量及用水量均居世界前列的国家。之所以缺水严重，主要是水资源利用效率较低，水资源浪费惊人！农业上大水漫灌面积占全球第一位，农业用水高达4000亿m^3/a，远远超过美国的1725亿m^3/a，工业上发达国家每生产1t钢铁只需6m^3水，而我国却要23m^3的水。我国水资源问题的出路主要是节约用水，农业上要采用先进的渗灌、滴灌、喷灌等节水技术，工业上要一水多用，处理废水和综合利用，实行水资源市场化。

063 中国盐湖的类型与分布

我国是世界上的盐湖大国之一。从我国西部的西藏、新疆、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西直至东北的吉林、黑龙江等省区广泛分布着数以千计的盐湖，可谓星罗棋布。

众所周知，盐湖即高含盐量湖泊的总称。按盐湖卤水赋存状态可分为卤水湖、干盐湖和沙下湖。卤水湖是一年四季在盐湖表面都有卤水存在的盐湖，盐类沉积仅见于岸边或湖底某些部位，如新疆的艾比湖、青海的尕斯勒湖、西藏的伊布茶卡湖等。干盐湖——我国新疆的罗布泊和青海的察尔汗都是世界上最大的干盐湖。在察尔汗干盐湖上有32km的“万丈盐桥公路”，附近有与之平行的青藏铁路，路基也是用盐铺砌而成的，飞机场用的跑道也是盐和卤水修筑而成。仅察尔汗干盐湖的石盐储量就可供应全世界食用2000年。沙下湖是盐湖发展过程的最后阶段，它是盐湖向盐矿的过渡湖，如内蒙古湖区的雅布赖盐湖，沙层广布全湖

区，厚度为0.5～2.0m。按主要盐类又可将盐湖分为石盐湖、芒硝湖、碱湖、硼酸盐盐湖和钾镁盐盐湖。石盐湖在我国四大盐湖区（新疆、西藏、青海、内蒙古）中比比皆是，如内蒙古湖区的吉兰泰盐湖、新疆湖区的帕尔干布拉克盐湖、青海湖区的茶卡盐湖、西藏湖区的玛尔果卡盐湖。芒硝湖即主要盐类为芒硝（$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$）的盐湖。芒硝是低温矿物，我国西部大多数盐湖的芒硝都是在距今1万a前末次冰期寒冷干旱气候条件下形成的。我国较大的芒硝湖有青海湖区的察汗斯拉图、西藏湖区的伊布茶卡、内蒙古湖区的西居延海、新疆湖区的艾丁湖和巴里坤湖。艾丁湖是我国海拔最低的盐湖，湖水表面为海拔－155m。碱湖沉积多为天然碱（$NaHCO_3 \cdot Na_2CO_3 \cdot 2H_2O$）、苏打（$Na_2CO_3 \cdot H_2O$）、水碱（$CaCO_3 \cdot H_2O$）、重碳酸钠盐（$NaHCO_3$）和钙水碱〔$Na_2Ca(CO_3)_2 \cdot 2H_2O$〕等。我国的天然碱—苏打湖多分布在内蒙古湖区，较大的碱湖有查哈诺尔、湖洞察汗淖、察汗淖、查干诺尔等盐湖。硼酸盐盐湖除常见的盐类沉积（如石盐、芒硝、石膏等）外，还有大量的硼酸盐沉积，以沉积硼砂（$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$）为主的，有西藏湖区的班戈错、郭佳林错；以沉积钠硼解石（$NaCaB_5O_9 \cdot 8H_2O$）、柱硼镁石（$MgB_2O_4 \cdot 3H_2O$）为主的，有青海大、小柴旦盐湖；以沉积库水硼镁石和多水硼镁石（$Mg_2B_6O_{11} \cdot 15H_2O$）为主的，有藏北札仓茶卡盐湖；钾镁盐盐湖发现于柴达木盆地达布逊湖北缘，作为钾镁盐湖主要矿石矿物的光卤石（$KMgCl_3 \cdot Cl \cdot 6H_2O$）沉积面积达60$km^2$，达布逊盐湖也是世界上惟一出现大面积钾镁盐沉积的盐湖。除达布逊盐湖外，还有大浪滩盐湖、马海盐湖及钾湖等，它们都产出于柴达木盆地。通过大量盐湖卤水化学分析数据计算表明，我国四大湖区的内蒙古和西藏湖区的盐湖主要为碳酸盐型和硫酸盐型。就硫酸盐型盐湖而言，内蒙古多为硫酸盐—芒硝湖或硫酸盐—芒硝石盐湖，而西藏则主要为硫酸钠亚型盐湖。此外高原的特殊地质环境又造成了西藏盐



湖卤水中稀碱金属 Li、Rb、Cs 含量非常丰富。智利的阿卡塔玛盐湖，Li 含量为 1570mg/L，而我国西藏札布耶茶卡南湖，晶间卤水 Li 含量为 1724mg/L，较阿卡塔玛盐湖为高。新疆和青海湖区的盐湖主要为硫酸盐型和氯化物型。值得指出的是新疆的罗布泊盐湖为硫酸镁亚型钾盐湖，而青海的氯化物型盐湖则多为氯化物型钾镁盐湖，硫酸镁亚型盐湖多为硫酸镁锂硼盐湖。

目前具有大规模开采利用价值的固体硫酸盐是芒硝和天青石（$SrSO_4$），仅柴达木盆地大浪滩，察汗斯拉图干盐湖探明的硫酸钠比世界已探明的总量还多 20 亿 t。氯化物资源主要是石盐，遍布各湖区，以柴达木盆地盐湖储量最为丰富，总量超过 3600 亿 t。盐湖卤水是各国盐湖矿产开发的重点。我国大型卤水矿产均分布于贺兰山以西的西部湖区。大型钾镁盐湖卤水主要分布于西部湖区中部；大型硼锂盐卤水主要分布于青藏高原的盐湖中，除 B、Li 外，钾资源也比较丰富，K、B、Li、Mg 可同时开发利用。

根据目前的勘查开发资料统计，我国四大湖区是巨大的盐类资源宝库，石盐的资源/储量约数千亿吨，芒硝和镁盐约数十亿吨，钾盐约数亿吨，天然碱和锂盐约数千万吨，如果把它们加工成初级产品，其潜在价值近 100 万亿元（张彭熹，2000）。随着我国西部的大开发，上述丰富的盐湖资源对西部经济繁荣，对我国 21 世纪的现代化建设将发挥重要作用。

064 神秘的地下世界——岩溶洞穴

我国岩溶分布广泛，不仅发育了许多奇特的地表景观（如桂林的峰林谷地，云南路南石林，川西北岷山中的黄龙、九寨沟等），而且还发育了许多神秘的岩溶洞穴（如桂林的七星岩洞、芦笛岩洞、莲花洞，云南石林周围的紫云洞、九乡洞，贵州的织金洞，北京的云水洞，山西宁武的万年冰洞等），那么岩溶是什么？岩溶洞穴又是如何形成的？它是怎样的一个发育过程呢？



岩溶，国外称 Karst，原为 kras，是斯洛文尼亚特里亚半岛上一个石灰岩分布区的地名，由于国外对具有奇峰异洞的石灰岩地貌都以 Karst 称呼，所以我国也沿用这一名称，并音译为喀斯特。实际上岩溶和喀斯特是一码事。

岩溶之所以发生，其主因是水对可溶性岩石，主要是对碳酸盐岩（石灰岩、白云岩等）以及对硫酸盐岩（石膏、硬石膏等）和卤化物岩（岩盐等）的溶蚀作用[①]，即“岩石的溶解”作用（岩溶作用）所形成。岩溶作用在地表形成了千奇百怪的岩溶地貌，在地下形成了神秘的地下迷宫——岩溶洞穴（系统），也就是说，任何岩溶洞穴（系统）都是以水的溶蚀作用为基础的，伴有复杂的水力侵蚀、冲蚀与沉积作用，并经过漫长的地质年代逐渐扩展形成。岩溶洞穴（系统）的早期发育是简单的岩溶通道，之后通道不断串接，才形成了复杂的洞穴系统，因此洞穴系统最基本的单元是通道，而控制通道发育的基本因素有三个方面：1. 岩溶层面，层面有利于水流的渗透；2. 节理与裂隙，它们也有利于水流渗入而产生溶蚀作用；3. 断裂带，在其破碎的一侧有利于水流运动，有利于发育成岩溶通道。岩溶通道相互连接、相互沟通并扩展形成大的岩溶通道系统。根据通道形状通常将其区分为三种：1. 垂直通道，多为溶蚀竖井，发育深度几十米至 100 多米，深者达 300 多米；2. 倾斜通道，受裂隙层面及倾斜断层控制，这类岩溶通道与垂直通道的累加深度即岩溶洞穴（系统）的发育深度，可达 1000m 以上；3. 水平通道，除受节理、裂隙（断裂）和层面控制外，还受当地河水水面控制，并使洞穴通道中汇集的岩溶水流向河流排泄，从而导致水平洞穴通道更加发育。垂直、水平、倾斜三种通道的相互连接和贯通即构成一个完

① 硫酸盐岩和卤化物岩可以被水直接溶解，而碳酸盐岩被水溶解或溶蚀要借助于 CO_2 及其他酸类起溶剂作用。

整的洞穴通道，许多完整洞穴通道的连接与贯通即形成一个完整的岩溶洞穴系统，发育较完整的洞穴系统有独立的补径排功能，在三维空间或二维平面上呈网状和树枝状展布（最为常见），网状和树枝状洞穴内的通道错综复杂，在黑暗的地下，这类纵横交错的洞穴称为迷宫状洞穴系统。洞穴发育晚期洞穴通道产生了许多岩溶形变和水流沉积物。洞穴通道顶部坍塌后其残留部分似桥形者称天生桥，而洞穴内流动的水流因坍陷而成为敞露水流的暗河河道称为盲谷，所形成的漏斗状地形称为塌陷漏斗，呈碟状和条状凹洼者称塌陷洼地，部分洞穴顶板塌陷后则称为天窗。在碳酸盐岩和硫酸盐岩相间分布区，比如山西晋中地区，由于石膏易于溶解，遇水膨胀（膨胀体积可达64%），从而导致碳酸盐岩胀破，而成为角砾状，角砾更易于受水流的溶蚀和侵蚀，并发育岩溶通道与洞穴，伴随着洞穴发育过程，岩溶产生塌陷，形成陷落柱（王锐，1982）。这类陷落柱在华北煤系地层内十分发育。地壳运动可使洞穴系统沉降至海或湖水面以下，而为新的湖或海沉积物所覆盖，并使前岩溶洞穴通道被这些沉积物所填充而不能再发展。这种被填充的岩溶洞穴是之前古岩溶发育的例证。

岩溶洞穴中的水流沉积物——钙华非常发育。钙华也是最迷人、最多姿多彩的化学沉积，它是已溶于水中的 $CaCO_3/MgCO_3$ 因过饱和而产生的沉积。沉积速率一般为 0.009～0.5mm/a，少数可达 1mm/a 以上，以平均 0.05mm/a 计，则直径为 10cm 的石笋钙华沉积需 2000a，1m 直径的钙华沉积需 20 000a。目前洞穴中的钙华大多是数万年至几十万年前沉积的，有的更古老，其年龄在 100 万 a，甚至二三百万年以上。

我国岩溶洞穴可以说不计其数，据专家（卢耀如，2001）推荐，我国大陆具典型意义，并已开放旅游的岩溶洞穴约 100 个。



065 海洋矿产资源

海洋中蕴藏着丰富的矿产资源，主要有海洋石油与天然气、多金属结核、富钴结壳、多金属软泥、块状硫化物矿床、磷块岩、滨海沙矿以及天然气水合物等。它们分布于海洋中各个不同的地貌单元（图 065－1）中。

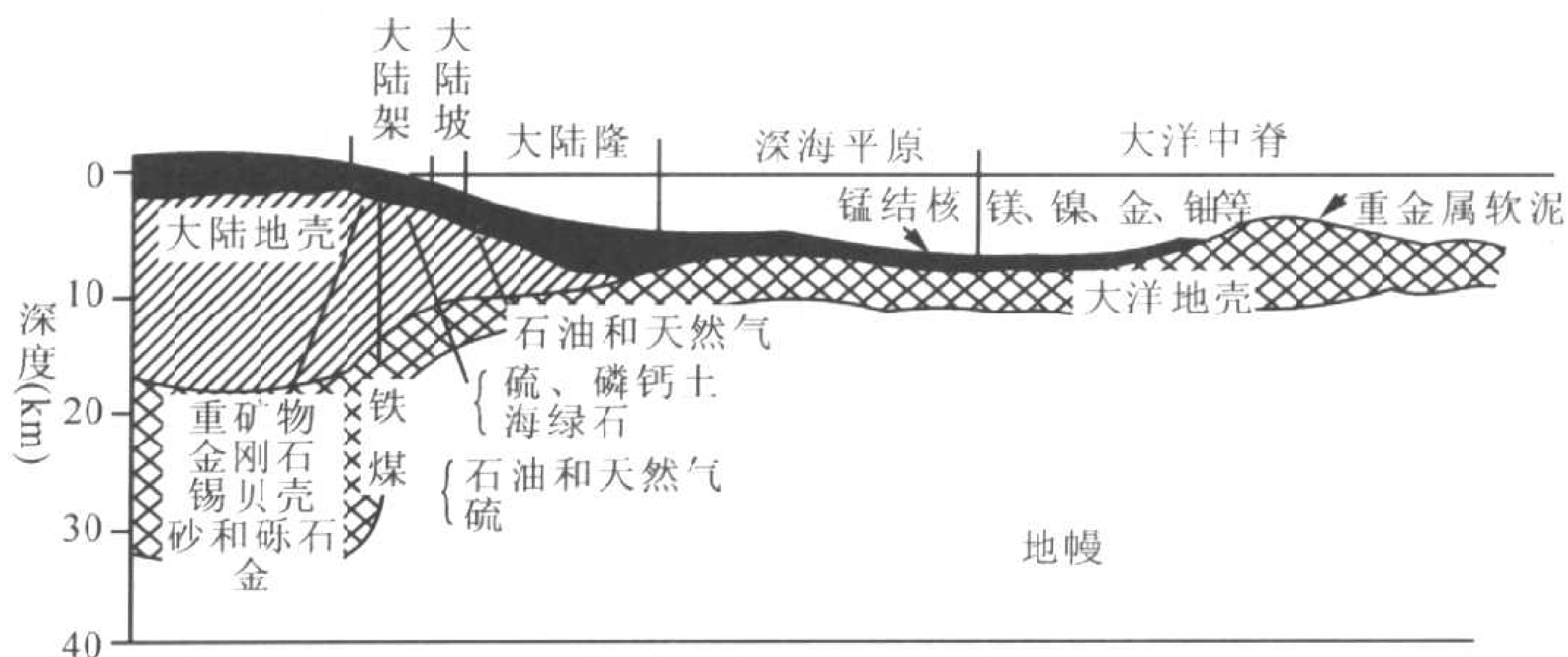


图 065－1 海洋各种地貌中的矿产分布

海洋石油与天然气：集中分布于海洋边缘地区，其中 80%～95%分布于离海岸 200 海里[①] 范围内，大陆架浅海区被誉为“海底石油的故乡”，目前全球已发现海洋油田 500 多个。著名的海上油田有欧洲的北海、美国的墨西哥湾、中东海湾、委内瑞拉的马拉开波湖、几内亚湾以及我国近海油田等，其中储量最大的是中东海湾（波斯湾），其次是马拉开波湖，二者占全球海洋石油量的 70%左右，第三是欧洲北海。在全球已探明的 70 余个大型油气田（石油储量在 6000 万 t 以上，天然气在 6000 亿 m^3 以上）中，有特大型油田（储量在 1 亿 t 以上）10 个，特大型气田（储量在 1 万亿 m^3 以上）4 个。20 世纪末，海上石油年产量在 1000 万 t 以上的国家有 11 个，其中以沙特阿拉伯、委内瑞拉及

① 1 海里＝1852m。

美国产量最多。生产井离岸最远的达500km，最大井深达7613m（美国路易斯安那州岸外7号井），平台最大水深约300m。目前我国已建成投产的海上油气田19个，海上原油产量已突破1500万t。据有关调查，未来我国南海很可能成为另一个波斯湾或北海油田。

多金属结核：是一种富含多种金属元素，并主要由铁锰氧化物和氢氧化物组成的“球状”沉积物。结核内部有核心，外部为铁锰壳层。壳层像千层饼一样将核心层层包裹起来。结核颜色主要为黑色或黑褐色，颜色的不同取决于结核内金属元素的含量。结核大小相差悬殊，从小于1mm的小结核到大于100mm的大结核。结核的形状，主要有球状、椭球状、板状、盘状、葡萄状、哑铃状、碎屑状，以及不规则状和各种连生体状等，多数形态不对称。迄今已知最大的结核是在菲律宾以东483km处打捞出来的一块巨型结核，重量达850kg。多金属结核是极为有用的矿产资源，它含有60多种金属元素，以铜、镍、钴、锰最有经济价值。根据迄今的海洋调查，所有大洋底部都有多金属结核分布，其中以太平洋底最多，覆盖面积近2300万km^2，资源总量达1.7×10^4亿t，有工业开采价值的总资源量达700亿t，以东太平洋海盆CC区（7°~15°N，114°~158°W）最富集，干结核资源量约21亿t，这21亿t干结核中可获得Cu（平均品位约1%）2000万t，Ni（1.3%）2700万t，Co（0.22%）460万t，Mn（25%）5.28亿t。

富钴结壳：又称锰结壳、铁锰结壳、多金属结壳、钴结壳、富钴结壳、富钴锰铁结壳和结壳（简称）。因结壳中的钴含量比大陆矿床高出1~2个数量级，且比结核中含量还高，故称富钴结壳或富钴铁锰结壳。与结核不同，结壳是一种生长在硬质基岩上的富钴等多种金属元素的“壳状”沉积物，结壳厚度2~5cm，平均丰度40kg/m^2左右，覆盖率80%~100%。结壳化学成分有4组：1. 主要元素为Co、Ni、Mn、Cu、Fe；2. 伴生元素有Au、

Ag、Pt、Pd、Rh、Os、Ir、REE、Mo、W、Bi、Sn；3. 有害元素是 As、S、P、F；4. 氧化物（矿渣）有 SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3、MgO、CaO。由于富钴结壳含有如此多的金属元素可以综合利用，所以价值较高。另外，结壳的分布海域与结核不同，结核主要分布于 5000m 深的深海盆，而结壳主要分布在水深较浅的海山区。现有资料表明，结壳的富集海域为中太平洋海山区、约翰斯顿岛、夏威夷群岛、马绍尔群岛、莱恩群岛、麦哲伦海山区、南太平洋波利尼西亚群岛和库克群岛等。在我国南海海盆和陆坡 1500m 水深的一些海山区也有发现。

海底热液硫化物矿床：是由海底热液成矿作用所形成的，一般分布于洋中脊和各边缘海的扩张脊。我国东海冲绳海槽亦有发现，由于中脊区（裂谷带）地壳很薄，张性断裂又很发育，深部地幔物质沿断裂不断上涌至海底，形成较高的地热场，在海水的化学参与和生物化学作用下，在海底形成一系列高差数十厘米至数十米的丘状堆积物，这些堆积物中，金属通常以硫化物形式存在，故称之为海底热液硫化物矿床。有两种类型：块状硫化物矿床和多金属软泥块状硫化物矿床，主要分布于东太平洋海隆和大西洋中脊。海洋调查表明，海底热液排出时常形成“海底烟囱”。当含有多种金属元素的热液喷涌而出后，由于物理化学条件的改变，使矿液中的金属硫化物和铁锰氧化物沉淀形成块状硫化物矿床。多金属软泥主要分布于红海裂谷带，目前已发现多金属软泥盆地 18 个，因软泥之上常覆盖着厚厚的高盐水层，故常称“盐水池”软泥。“水池”被认为是最具有经济价值的多金属软泥矿区，初步估算，其资源量为：铁 2430 万 t（平均品位 29%），锌 290 万 t（3.4%），铜 106 万 t（1.3%），铅 80 万 t（0.1%），银 4500t（0.0055%），金 45t（0.5×10^{-6}）。其他海域（如东太平洋海隆等）也发现有多金属软泥。一般认为，海底多金属软泥是由岩浆活动产生的热液流经周围岩石或沉积孔隙时与围岩发生化学

反应沉积生成的。

磷块岩：又称磷钙土，是一种复杂的钙质磷酸盐岩。有三种类型，即磷钙土结核、磷钙土砂和磷质泥，以前两种为最主要。主要化学成分为 P_2O_5（占 20% ~ 30%）、CaO（30% ~ 50%）、F（3.5% ~ 4%），并含少量的 U、V 以及稀土元素。太平洋、大西洋、印度洋的陆架区和大陆坡上部，以及深海区的海山上均有产出。我国于 1997 年在西北太平洋麦哲伦海山调查时采集了一批磷块岩样品。

滨海砂矿：指分布于现今海岸低潮线以上具有工业价值的各种有用矿物。我国的滨海砂矿主要由沿岸出露的前新生代风化含矿母岩，经河流搬运到滨海地带，在海流、海潮的反复作用下，使比重大的矿物在有利的滨岸部位富集而形成。据调查，我国滨海砂矿主要分布在辽宁、山东、福建、广东、广西、海南和台湾的滨岸地带。砂矿矿种有钛铁矿、金红石、锆石、磷钇矿、砂锡矿、铬铁矿、铌铁矿、独居石、磁铁矿、砂金以及石英砂和型砂等，此外还发现有金刚石和砷铂矿。世界上已有 30 多个沿海国家开发利用滨海砂矿。

为进一步开发海洋资源，近年来许多国家已把目光投向一种海洋新能源——天然气水合物。所谓天然气水合物，顾名思义，是由天然气和水组成的固体物，外貌极像冰雪或固体酒精，点火即可燃烧，故俗称为“可燃冰”、“气冰”、“固体瓦斯”等。在标准状态下，水合物中气体体积与水分子体积之比为 164∶1，$1m^3$ 的水合物可包容 $180m^3$ 的甲烷气体，一旦冰融，气体便全部释出。在海洋中水合物主要赋存于海底的低温高压带（气体水合物稳定带）中，为固体矿层，矿层厚数十厘米、数米至上百米。水合物储集岩性为粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩、砂岩及砂砾岩。储集层中的水合物含量可达 95%。目前已发现的水合物产地，主要分布于各大洋中，其中太平洋 25 处，大西洋 15 处，北

极海5处，南极海3处，印度洋3处，黑海1处，里海2处。另外我国南海、日本海、地中海、挪威海、巴伦支海等海域也有发现。天然气水合物被科学家誉为“未来能源”及“21世纪能源”，并已成为发达和发展中国家地质调查的重点。

066 波斯湾石油为何如此丰富

波斯湾又称阿拉伯湾，是一个充满神秘感和诱惑力的海湾。波斯湾及波斯湾附近国家包括沙特阿拉伯、科威特、伊朗、巴林、阿拉伯联合酋长国、卡塔尔、阿曼和伊拉克8国，面积约474万km^2（包括波斯湾24万km^2）。在地质上，波斯湾及其8国邻域是由地中海、红海和阿拉伯海以及札格罗斯山脉所围括的阿拉伯板块。中生代以来，阿拉伯板块与周围相互作用，形成东部挤压，西部拉张，南部和北部为转换断层所连接的构造格局。

波斯湾石油贮量相当丰富，占世界可采石油储量的2/3，天然气占1/3，所以直到第二次世界大战结束后，中东石油还为英、美、法等发达国家的大公司所控制，直到20世纪60年代石油输出国组织欧佩克（OPEC）成立，中东国家才逐步实行石油工业国有化，收回石油资源，发展本国经济。

据20世纪末的统计，中东石油可采储量为900亿t，天然气为49.3万亿m^3。在石油储量前10位（沙特阿拉伯、伊拉克、科威特、阿拉伯联合酋长国、伊朗、委内瑞拉、独联体国家、墨西哥、利比亚、中国）的国家（地区）中，中东国家占据了前5位。空间上中东石油主要分布于阿拉伯板块边缘及札格罗斯山山前，此外在两区外围亦有少量分布。目前该区已发现油田484个，气田76个，其中石油可采储量在6亿t以上的大油田有95个。沙特阿拉伯的加瓦尔为世界第一大油田，原始可采储量为114.8亿t，第二大油田为科威特的布尔甘，原始可采储量为105亿t，沙特阿拉伯的海上油田萨法尼亚为世界第三大油田（海上第一大油田），原始可采储量

为50.5亿t。中东之所以有如此丰富、如此巨大的油田是阿拉伯板块特定的石油地质条件,即“生、储、盖、圈、运、保”所决定的,“生”者即生油岩,是油气生成的物质基础,“储”指储集岩,“盖”是盖层,“圈”即圈闭,“运”是指油气的运移通道(输导层或断层),“保”即油气的保存条件。

中生代时阿拉伯板块，特别是其东南部处于赤道地区的热带海洋滞流环境，由于海洋中微生物极为发育，具有高生物生产率，所以沉积了沥青质碳酸盐岩及有机质丰度较高的泥岩。侏罗纪的黑色沥青质灰岩及黑色页岩总厚度达500m，总有机碳含量为3.1%~4.4%，球粒灰岩的有机碳含量为3%~5%，以腐泥型干酪根为主；白垩纪海相页岩的总有机碳含量为3%~12%。这些都是优质生油岩，是波斯湾油气富集的物质基础，这是其一。其二是生油岩与储集层的时空匹配比较合理。中生代的波斯湾为一宽阔的陆架边缘海。重力均衡及沉积负载使海盆不断下降，而板块运动又使盆地不断抬升，其结果是在快速沉积的盆地区形成凹陷，广泛沉积了上述生油岩，而在凹陷边缘则沉积了粗粒碳酸盐岩、海岸砂岩及礁相储集层，在局部地区发育了河流—三角洲相砂岩储层，而盆地内部发育的蒸发岩或海进泥岩则成为良好的区域或局部盖层。第三，盆地长期处于稳定的、几乎无间断的沉积过程中。位于阿拉伯板块的波斯湾盆地，其实是一宽2000~3000km，长4000~6000km的广阔地区，除第三纪的阿尔卑斯造山运动使阿拉伯板块与欧亚板块碰撞缝合，并在其北东部形成札格罗斯造山带外，总体上是一个长期稳定的、几乎是无间断的沉积（至少570~65Ma）进程，其结果是生油岩、储集岩和盖层的分布范围较广，一方面可产生有效的侧向运移，把生油凹陷中的大量油气运移至大型平缓的构造圈闭中；另一方面稳定的地质条件，又使油气得以有效地聚集和保存。此外，发生于新生代的阿尔卑斯造山运动，除形成札格罗斯等巨大的NW—SE向挤

压构造和断裂构造外，还在札格罗斯山前形成了前陆盆地，盆地中发育了较厚的新生代中晚期沉积，在广泛的蒸发岩盖层下，大量油气通过深部断裂垂向运移至高裂隙的第三纪碳酸盐岩储层中，有利于油气的勘探和开采。中东这一亘古以来就是沙漠—半沙漠的地区，其下则是前沙漠时期形成的棕色金子——石油，是不应该因沙漠（半沙漠）覆盖而被忽视的地质构造单元。对曾孕育过世界四大文明发源地之一的幼发拉底河和底格里斯河流域是永远不能被忽视的。

067 中国矿产资源的时空分布

我国幅员辽阔，地质构造多样，矿产成矿条件优异。表现在：1. 各地质时代地层出露齐全，总面积达 8 602 610km^2，占全国陆地面积的 89.6%，其中新生界出露面积占地层总面积的 46.0%，中生界占 28.5%，古生界占 17.7%，元古界（宙）占 6.9%，太古界（宙）占 0.9%；2. 不同时期岩浆活动，特别是燕山期岩浆活动广泛而强烈，对我国金属及非金属矿产的形成起着重要作用；3. 中国大陆处于欧亚板块、东太平洋板块、菲律宾板块、印度板块几个大板块的接壤地区，并受几种不同大地构造单元的控制，此为不同矿产的形成创造了良好的构造岩浆条件。此外我国陆地面积为 960 万 km^2，海域为 470 万 km^2，且自西而东高低地形错落有序，呈三级海拔阶梯递降至海边，这都为我国不同矿产的形成和分布提供了广阔而多样的储矿空间。根据 20 世纪 50 ~ 90 年代以来的勘查评价，各个沉积地层及不同岩浆活动期主要矿产的时代分布综合如表 067 – 1。受地层岩性控制的能源矿产主要分布于较新地层中，金属矿产，特别是有色金属矿产主要与燕山期岩浆活动有关，现对居世界前列的我国优势矿产的产出分布简要说明如下。

表067－1 中国各地质时代（岩浆活动期）主要矿产分布表

地质时代		与沉积地层有关的主要矿产	与岩浆活动有关的矿产资源	
			主要矿产	岩浆活动
新生代	第四纪	盐类、泥炭、天然气、地下水、地热、高岭土、砂矿	Cu、Pb、Zn、Cr、Sn、建筑石料	喜马拉雅
	第三纪	石油、天然气、煤、膏盐、硅藻土、高岭土、建筑石料		
中生代	白垩纪	煤、石油、天然气、油页岩、膏盐、铜、钾盐、建筑石料	W、Sn、Bi、Mo、Cu、Pb、Zn、Hg、Sb、Fe、Au、REE、RME;萤石、叶蜡石、膨润土、珍珠岩、建筑石料	燕山
	侏罗纪	煤、石油、天然气、铁、铜、盐、膨润土、滑石、建筑石料		
	三叠纪	煤、石油、天然气、油页岩、石膏、盐、钾盐、石灰岩、铜、锰、萤石	Cu、Pb、Zn、Fe、Ni、Sb、RME、云母	印支
早古生代	二叠纪	煤、石油、天然气、油页岩、铝土矿、耐火粘土、石灰岩、高岭土	Cr、Fe、Cu、V、Ti、Ni、W、Sn、Mo、Pb、Zn、RME、石棉、金刚石、菱镁矿、滑石、蛇纹石、云母	海西
	石炭纪	煤、铝土矿、石油、天然气、耐火粘土、石膏、高岭土、REE、RME、S、Mn、Fe		
	泥盆纪	Fe、Mn、P、Au、石膏、石灰岩		
晚古生代	志留纪	Mn、P、Fe	Ni、Co、Fe、Cr、Cu、Pt、Hg、Au、REE、RME;石棉、金刚石、菱镁矿、滑石、蛇纹石、云母	加里东
	奥陶纪	石油、天然气、白云岩、石灰岩、石膏、重晶石、Fe、V、U、P、S		
	寒武纪	P、Fe、Mn、V、REE、S、V、重晶石、天然气、石油		
新中元古代		P、Fe、Mn、Cu、REE、RME、Au、B;天然气、石油、菱镁矿、白云岩、石灰岩、大理石	Cu、Fe、Ni、Cr、W、Sn、Mo、Ta、REE;石棉	晋宁一四堡
古元古代		Fe、Cu、Pb、Zn、Au;石墨、硼、菱镁矿、滑石	Fe、Cu、Ni、Au;石棉、菱镁矿、滑石	五台
新太古代		Fe、Cu、Au	Au、Ca、Fe、Ni、REE;硼、蛇纹岩、橄榄岩	前五台
中太古代		Fe、Au;石墨、云母		

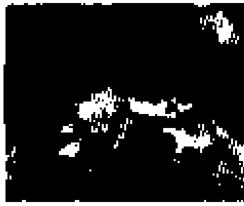
能源煤炭主要分布于我国北方的山西、陕西、内蒙古及新疆，河南、山东、安徽、贵州、云南以及黑龙江等省区亦有产出；石油及天然气主要分布于我国近海海域及我国北方、西北及西南各省区。最近在内蒙古伊克昭盟发现的7000亿 m^3 的苏里格大气田，标志着我国气田已进入世界知名大气田行列。我国已探明的金属矿产有54种，它们是Fe、Mn、Cr、Ti、V、Cu、Pb、Zn、Al、Mg、Ni、Co、W、Sn、Bi、Mo、Hg、Sb、Pt、Ru、Rh、Pd、Os、Ir、Au、Ag、Nb、Ta、Be、Li、Zr、Sr、Rb、Cs、Y、Ca、Tb、Dy、Ce、La、Pr、Nd、Sm、Eu、Ge、Ga、In、Tl、Hf、Re、Cd、Sc、Se、Te，其中W、Sn、Sb、Hg、REE、V、Ti居世界前列；已探明的非金属矿产有88种，其中有15种位居世界前列，它们是菱镁矿、石棉、石墨、石膏、重晶石、膨润土、芒硝、天然碱、珍珠岩、滑石、萤石、硫铁矿、磷块岩、高岭土、耐火粘土。我国矿产资源之所以如此多种多样，主要与客观上存在着诸多有利的成矿因素和广袤的储矿条件有关。

我国能源矿产及金属、非金属矿产的空间分布，可参阅有关书籍的矿产分布图。本书为篇幅所限，没有收录。

068 中国矿产资源在世界上的地位

根据20世纪90年代的统计，全国已发现矿产种类168种，探明有一定资源储量的矿产152种，已开发利用的132种，矿产地20多万处，其中探明有油气的油气田400多处，有勘查资源/储量的矿区1.5万多个。探明资源/储量的总潜在价值居世界第3位，仅次于美国（第1位）和前苏联（第2位），但按人均拥有量计算较低，只为世界人均拥有量的1/3，居世界第80位，不到美国的1/10，前苏联的1/7。

在与同期45种矿产（朱训等，1999）比较后得知，我国有34种矿产居世界前列（表068－1），固体矿产值（1996）占世界



产值的16.5%（表068－2）。在34种矿产中以WO_3、Sb、Bi、Mo、Sn、REO、Hg、V_2O_5、TiO_2及石棉、菱镁矿等具有较大优势，在45种矿产中Ag、Fe、Pb、Cu、Au、B、Ni、U以及石油、天然气的资源/储量相对不足，短缺的矿种为钾盐、金刚石、铂和铬（程裕淇，1997）。

表068－1　中国位居世界前列的34种矿产

矿　种	世界位次	代表性产地	矿　种	世界位次	代表性产地
煤	2/3	山西大同	锶($SrSO_4$)	2/3	青海大风山
铁(TFe)	4/5	辽宁鞍(山)本(溪)	稀土(REO)	1	内蒙古白云鄂博
钛(TiO_2)	4/5	四川攀枝花	菱镁矿	1	辽宁营口
钒(V_2O_5)	2/3	四川太和	耐火粘土	5	山西阳泉
锰(Mn)	4	湖南民乐	萤石	2/3	浙江武义
铅(Pb)	3/4	云南兰坪	磷(P_2O_5)	4/5	云南昆阳
锌(Zn)	3/4	云南金顶	硫(S)	4/5	广东云浮
钨(WO_3)	1	江西西华山	硼(B_2O_3)	4/5	辽宁宽甸
锡(Sn)	1/2	广西大厂	天然碱	4	河南桐柏
钼(Mo)	2/3	陕西金堆城	芒硝	1	内蒙古达拉特旗
铋(Bi)	1	湖南柿竹园	重晶石	1/2	福建永安
锑(Sb)	1	贵州务川	石棉	3	青海芒崖
汞(Hg)	3	贵州万山	石墨	1/2	黑龙江鸡西
锂(Li_2O)	2/3	新疆可可托海	石膏	1	湖北应城
铌(Nb_2O_5)	2/3	内蒙古白云鄂博	滑石	2/3	辽宁海城
钽(Ta_2O_3)	1/2	江西宜春	膨润土	2	浙江临安
铍(BeO)	2(?)	新疆可可托海	硅灰石	1	吉林浑江

注：根据中国矿产资源报告(1996～1998)等有关资料综合。



表 068-2　　中国主要矿产品在世界上的地位

序号	品　种	单　位	世界产量	中国产量	中国占世界(%)
1	煤	亿 t	46.07	13.5	29.3
2	石油	亿 t	31.68	1.5	4.7
3	钢	亿 t	7.5050	1	14.2
4	铁矿石	亿 t	10.13	2.5	24.67
5	10 种有色金属	万 t	5718.75	529.67	9.26
6	金	t	2130	121	5.6
7	稀土氧化物	t	65335	30 000	45.9
8	磷矿石	万 t	14343.6	3106	21.65
9	萤石	万 t	389.2	190.0	35.98
10	滑石	万 t	720.0	240.0	33.33
11	重晶石	万 t	532.8	177.04	33.8
12	硅灰石	万 t	42.0	23.0	54.76
13	石墨	万 t	72.0	35.0	48.61

注:引自倪集众(2000)。

按原地质矿产部估计，到 2020 年前后，在 45 种矿产中约有 1/2 不能满足需要，还有部分矿产的资源/储量对我国 21 世纪的现代化建设保证程度偏低，特别是石油、铜、铁、铬、硫、钾盐等矿产，其短缺趋势很可能会日趋严重。短缺矿产虽然可以通过国际市场进口解决，但我国人多地广，需要量往往相当大，如大量进口，不仅将刺激其价格暴涨，造成沉重的经济负担，还要承担国际政治经济风云突变的风险。实际上，我国绝大多数金属和非金属矿产，目前的开采深度并不大，仅为 500m 左右，只有石油和天然气较大，为 4000~5000m，这意味着深部及边部找矿与采矿的潜力还很大。

此外，我国在矿产资源开发利用上也存在许多亟待解决的问题。建国以来，我国实行的矿产开采办法基本上是不同工业部门

按矿种（矿组）分别开采的部门体制，对大多数共伴生综合矿产，只开采利用其中的一种，甚至是并不重要的一种，不仅造成了综合矿产的严重损失和浪费，而且增加了开采成本，加剧了环境污染，加大了三废治理难度，这种开采状况在国际上是很少见的。而比此更为恶劣的则是采富弃贫，采厚弃薄，取一弃十和乱采滥挖，这种现象在一些矿产资源大省普遍存在，其对矿产的破坏和浪费（据统计，矿产总利用率在30%左右，约为发达国家的1/2）所造成的环境污染和生态系统的破坏可以说触目惊心！当然矿产开发也有科学技术方面的问题，针对我国矿产资源的组分特点和产出实际的研究重视不够，力度不足，缺少精兵强将，致使品位偏低或组分复杂的综合矿产迄今仍难以科学地综合利用，对一些非金属矿产的物理性质和应用研究也相当薄弱。

除科学技术方面的问题外，对矿产资源开发在社会经济发展中的作用，特别是在知识经济社会中的作用也还有认识问题。实际上世界上的发达国家都是依靠矿产资源得以工业化后才进入知识经济社会的。我国是发展中国家，还需要经过较长的工业化时间，因此不能忽视矿产资源的支柱作用。没有矿产资源及其他自然资源的支持就不能实现工业化，也就不可能进而发展到知识经济社会，而与发达国家并驾齐驱。

069 地球地质环境

地球上一切生物的生存和发展都离不开地球物质和地球空间，由这种物质和空间所构成的一个系统或巨系统就是环境或大环境。

这里所说的地球地质环境，主要指人类所处的自然环境。自然环境，包括人类赖以生存的环境要素——空气、阳光、水、土壤、矿物、岩石和生物等，以及由这些要素构成的各圈层——大气圈、水圈、土壤圈、生物圈和岩石圈。这些要素和圈层构成了

人类的生存环境和地理环境，并关系到人类社会未来的可持续发展。以大气圈为例，它不仅保护着地球，保护着地球上的生物，而且还为地球表层生命提供所必须的氧气以及其他气体，同时还可阻挡辐射到地球的紫外线。从地球形成至今，大气圈各组分之间就维系着一种精细的平衡，这种平衡是维护生物生命所必需的，破坏这种平衡就是破坏了生命的基础。水圈和土壤圈与大气圈一样，都是地球环境的重要组成。土壤（土壤圈）和岩石（岩石圈）共同构成大地。土壤与岩石不同，土壤具有肥力，有提供和调节水、气、热和营养元素的能力，正是有了这层土壤（圈），才使得地球上有了广阔的森林、可耕作的农田和碧绿的草场，人类才能从中获得宝贵的生产和生活资源。土壤圈目前面临的灾难是荒漠化、水土流失、盐渍化、水涝（沼泽化）以及土壤污染等。岩石圈是人类生存环境最下面的一个圈层，也是地球内部各圈层的最外层。通常人们所说的地质环境，主要指岩石圈表层（上限）地质体以及岩石圈深部，甚至地幔（下限）。各类地质作用给人类所提供的生存环境，是具有一定空间的客观实体。对地球地质环境的评估，主要来自三个方面，即地质环境的容量、地质环境的质量及地质环境的反馈作用。

地质环境的容量：指某个特定地质空间可能承受人类社会经济发展的最大潜能。人类所有生产和生活的消费物质都是直接或间接地取自地质环境，而人类生产和生活的一切废弃物又都直接或间接地排放到地质环境中，所以地质环境的容量可以用可能为人类（包括一切生物）所提供的地质资源量和对人类所排放的废弃物的容纳能力来予以说明。地质资源量是地质环境系统内可供人类利用的一切物质的总和，人类的生存与发展都离不开对物质的需求。最初人类对地质资源的取用是无代价的，随后由于人口的急剧增长，资源的重要性突现出来了，它不再是一种自然物，而是具有经济、政治和军事意义的社会财富，成为人类占有、交

换和争夺的对象。人类历史上的许多争斗和战事都是争夺资源的战争，至今资源也还是世界上引起纷争的一个重要因素。

在现代技术条件下，地质环境中的地质资源应包括：1. 矿物资源、能源资源及建筑材料资源（矿产资源）；2. 土地资源（土壤、岩石、地貌、气候、水文、植被以及生物活动等）；3. 地质景观资源；4. 地质空间资源。地质环境对废弃物的容纳能力主要取决于环境中土壤、水体及岩石的净化能力。研究表明，地质环境中的岩石、土壤、水体具有自净功能，可以对污染物进行内部消化。

地质环境的质量：主要由环境的地球物理和地球化学因素所决定，环境质量的优劣对人类生活和社会经济发展有决定性意义。在目前至少应包括：1. 构造稳定性，地质条件是决定地质环境质量的主要因素，其中最重要的是构造稳定性、地形地质稳定性以及岩石稳定性等；2. 地球化学场，一定数量的 Ca、Mg、Na、K、N、O、P 等元素及微量元素是人体和其他生物生长发育所必需的，环境中某些元素含量过高或过低都有害，其他对人体有害的微量元素如 As、Cd、Hg 等均会影响人体健康；3. 抗干扰能力，地质环境脆弱的地区抗干扰能力较差，例如处于半干旱、半湿润气候带的华北平原，其农田水利活动稍有不当就很容易加剧土壤盐渍化；4. 受污染或受破坏的程度，当今的地球环境几乎不存在未受人类活动影响的空间，所看到的都是变异的空间，其中最主要的是废弃物对环境的污染，以及各种施工及经济活动对环境的破坏。

地质环境的反馈作用：指地质环境受人类活动干扰后，对干扰所作出的某种响应。从 20 世纪后半叶起，人类活动越来越深刻地干预着地球环境的自然过程，产生了一系列强迫因子，例如工业排放的 CO_2 和其他温室气体改变了地球大气的组成；强化农业对土地的利用方式和强度，改变了陆地的覆盖状况，从而对生

物地球化学循环过程和地表物理过程产生了影响。人类对环境的这种干扰活动，即人与环境的相互作用是更高层次的非线性过程。若环境有能力进行补偿缓冲和调整，则环境的稳定性表现为不易觉察的隐蔽形式；相反，当环境不能通过内部调节予以整合时，则只有通过剧烈的变动予以平衡，反馈就以显露的形式表现了出来。从20世纪70年代起学者们就开始了人类对地球环境影响的研究，进行着从整体上了解地球环境变化的探索。

070 全球环境变化

全球环境变化即全球变化，从国际上看，主要由国际地圈与生物圈计划（IGBP）、世界气候研究计划（WCKP）和全球环境变化的人为影响计划（HDP）所组成，是地学和生物学的前沿科学领域，特别是HDP计划引起了国际社会的普遍重视，因为包括人类在内的地球生物活动（主要是人类活动）已演变出了当今一系列前所未有的全球环境问题。这些问题是：气候异常、温室效应、臭氧空洞、环境污染、海洋污染、植被破坏、土地荒漠化以及生物多样性锐减等全球环境问题。

温室效应与全球变暖：气候变化古已有之，那是自然所为，而当今气候变化则是因人类强大的扰动活动，尤其是自工业革命以来，大量燃烧化石燃料，砍伐森林等，致使大量CO_2、CH_4、N_2O、臭氧、氟里昂气体排放到大气中，使大气圈的化学成分发生明显变化所造成。以CO_2为例，大气中的CO_2浓度正以每年0.4%的速率在递增，学者们估计，在未来30年全球平均温度将上升2℃（表070－1）。而已过去的100年中，全球平均温度上升了0.5℃～0.7℃，其间11个最暖年中有7个发生在最近10年，极端天气事件的频率和强度也在增加。如果目前温室气体排放趋势继续下去，到21世纪中期，全球将面临突破历史记录的气温冲击。温室效应已使20世纪80年代的海平面平均上升了

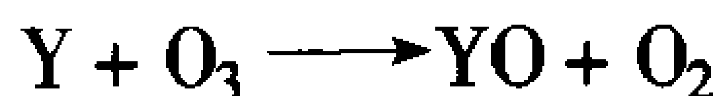
14cm，预计到2050年全球海平面将平均上升30~50cm，专家预测届时孟加拉国约1000万人口将丧失家园，美国佛罗里达60%的人口需要搬迁。此外温室效应将会显著缩小热带与极地之间的温差，从而影响全球天气系统的热动力机制，显著改变决定区域气候的大气环流和洋流格局。这种天气动力变化将改变许多地理区域的生态和生产条件，而且极端天气事件发生的频率、出现的时间、延时和分布都会发生变化。

表070-1　全球温室气体增长与气候变暖预期

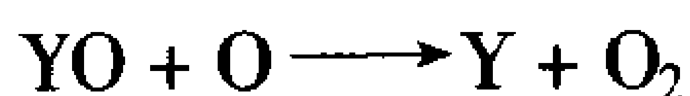
气体	工业化前浓度（$\times 10^{-6}$）	2000年浓度（$\times 10^{-6}$）	增温贡献（℃）	2030年浓度（$\times 10^{-6}$）	增温贡献（℃）
CO_2	280	380	0.96	470	1.19
CH_4	0.70	2.1	0.30	2.94	0.42
N_2O	0.21	0.31	0.12	0.33	0.17
F-11	0	0.41	0.06	1.03	0.15
F-12	0	0.55	0.08	1.93	0.14
F-13	0	0.08	0.01	0.32	0.05
合计			1.53		2.08

资料来源：欧阳自远，1997.

臭氧屏蔽破坏：臭氧（O_3）是氧的衍生物，大气圈平流层中保存约90%的臭氧。平流层中臭氧的催化反应主要是：

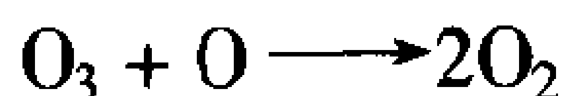


$$Y + O_3 \longrightarrow YO + O_2$$



$$YO + O \longrightarrow Y + O_2$$

净结果是：



$$O_3 + O \longrightarrow 2O_2$$

Y指平流层中的三类物质，即奇氮（NO、NO_2）、奇氢（OH、HO_2）和奇氯（Cl、ClO）。式中Y破坏了一个臭氧分子后本身却并没有被消耗，还可以继续破坏另一个臭氧分子。

臭氧和氧之间有一种动态化学平衡，在大气层中形成了一个较为稳定的臭氧层（距地面高度为15~25km）。臭氧层对太阳的紫外辐射有很强（99%）的吸收作用，因而能有效地阻挡高能紫



外线对地表生物的极大伤害。然而据20世纪80年代的航天观测数据表明，全球臭氧层浓度已降低了3.5%~3.6%，其中北半球减少了3.5%~5.5%，并在南极上空观测到了臭氧空洞。南极臭氧空洞正以每年相当一个美国陆地面积的速度在增长。此外近年来还在北极上空和我国西藏高原上空发现了臭氧层减薄，甚至出现“空洞”的现象。之所以会如此，主要与人类活动排放到大气中的氟氯碳化合物（氟里昂）和含溴化合物哈龙（Halons）等化学复合剂有关，即氯和溴在平流层通过催化反应破坏臭氧是造成臭氧空洞的根本原因。臭氧空洞的出现将使地面紫外线辐射增强，对人体健康，特别是对儿童健康，对陆地植物、海生生物，对生物化学循环，对对流层大气组成等都有显著影响。

土地荒漠化：据有关统计，目前全球沙漠面积已占陆地面积的10%，还有43%的土地正面临着沙漠化的威胁。据联合国环境规划署初步估计，荒漠化威胁着4800万 km^2 土地，约占全球表土面积的1/3，影响着至少8.5亿人民的生活。20世纪80年代初期，在全世界32.57亿 $hm^2$①生产旱地中，约有19.86亿 hm^2（占61%）遭受荒漠化和严重荒漠化。荒漠化都是在当地不利气候条件下，加上人类活动影响而形成的。土地荒漠化极大地改变了陆地表面物理性质，破坏了地表辐射收支平衡，诱发气候和环境恶化，而气候和环境恶化又进一步加速土地荒漠化，如此循环往复，从而对地球环境产生深远的影响。

海洋污染：主要是海上石油污染。海上石油的大规模开采始于20世纪。在石油钻探—开采—提炼—运输和使用过程中，都有一部分石油流失到海洋中，其中以大型油轮事故为最主要的污染。据统计，目前世界所需石油的2/3都是经海路运输的，过程流失石油达 $150\times10^4 t/a$，低浓度（几微克每升）分散的可溶性

① $1hm^2 = 1ha = 10^4m^2$。

石油已遍布于海洋的每个角落。据联合国环境署估计，每生产1000t原油就有1t散失到海洋中。海洋石油污染给海洋生物带来了一系列有害影响，因为最严重的石油污染往往发生在生产力最丰富的浅海区域。

近海赤潮（赤潮被认为是由于海水中微小藻类异常增殖而引起的海水变色现象，是各种色潮的统称）是海洋中又一严重污染，它是城市及工农业废水、污水大量排入近海海域，使得海水中无机氮浓度超过0.3μg/g，无机磷浓度超过0.01μg/g时，藻类（主要是浮游藻类）群落就会“暴发”增长，形成了浓密的“藻花”，藻类（有害藻）死亡腐烂消耗氧气，产生H_2S等还原性有毒气体，使海洋生物大量死亡，给海洋水产业和旅游业带来巨大损失。到20世纪90年代我国大陆的赤潮记录已达380次之多，相当严峻。

生物多样性锐减：自从38亿a前地球上出现生命以来，就不断有物种的产生和灭绝，但那是自然产生的灭绝，而目前的灭绝则主要是与人类活动有关的人为或社会因素的灭绝，比如过度猎杀和肆意捕获。

多样性的生命世界不仅可为人类提供食物、原料和能源，而且还是一个巨大的基因宝库，因为每一种基因都是大自然进化了千百万年的产物。对生物多样性的破坏，对生命自然栖息地的毁灭，将失去遗传物质和物种多样性，这是人类未来可持续发展的巨大障碍。然而由于人类对环境的破坏，在20世纪末，在现已知160万种动植物中大约有15%～20%已灭绝。地史上每次物种灭绝事件后，大约需要1000万a或更长时间，物种数量才能恢复到先前的多样性水平，所以以目前物种灭绝的趋势，如不采取措施加以制止的话，专家们认为，大约25～30年后，现还生活在地球上的所有珍稀物种将会灭绝，若果真如此，则人类活动造成的生物多样性减少的影响将是无法弥补的。

071 地质灾害

地质灾害是指由于地质营力变化，主要是外动力地质作用或人类活动影响，而导致地质环境发生变化，并由此而产生的各种灾害性破坏。地质灾害的种类有：崩塌、塌陷、滑坡、泥石流、地面沉降、水土流失、沙漠化和石漠化等。地震与火山虽亦属地质灾害，但属于那种人类惊骇万分的地质灾害，被戏称为地狱的通风口。

崩塌与塌陷：崩塌是陡坡岩（土）体在重力作用下突然坠落（滚落）的现象。规模巨大的岩体或山体发生崩塌称为山崩。崩塌广泛出现于山坡及河湖海岸边坡，因为那里的边坡较陡，通常在60°~70°之间，岩石裂隙发育，结构破碎，特别是在层理、辟理及裂隙面与坡向一致时，则崩塌可随时发生。崩塌是一种突发性的灾害，块体的运动速度很快，最大可达200m/s，崩塌下来的岩（土）体在山麓或陡崖下形成倒石堆，由大小石块及泥沙混杂堆积而成，结构疏松。崩塌发生时可摧毁森林、堵塞河道，掩埋村庄、土地及建筑。塌陷（地陷），包括地表塌陷和地表沉陷，前者指隐伏的溶洞或表土层中潜蚀土洞突然垮塌引起的地面变形，广泛分布于喀斯特（岩溶塌陷）和黄土（黄土塌陷）发育区；后者（地表沉陷）指由地下采空区顶板冒落所造成的地面变形（采空塌陷）。沉陷洼地边界与采空区边界连线的倾角称移动角，是预测沉陷范围的重要数据。

滑坡：是斜坡岩体或土地在重力作用下沿连续破坏面整体向下滑动的现象，是斜坡破坏的一种主要形式。滑坡发生的过程包括孕育、急剧变形和滑动、渐趋稳定三个阶段。滑坡不需太大坡度，在岩石中30°~40°即可，在松散层中20°以上即可产生滑坡。滑坡结构要素如图071－1。图中的滑动面、滑坡体和滑床是三个主要要素。

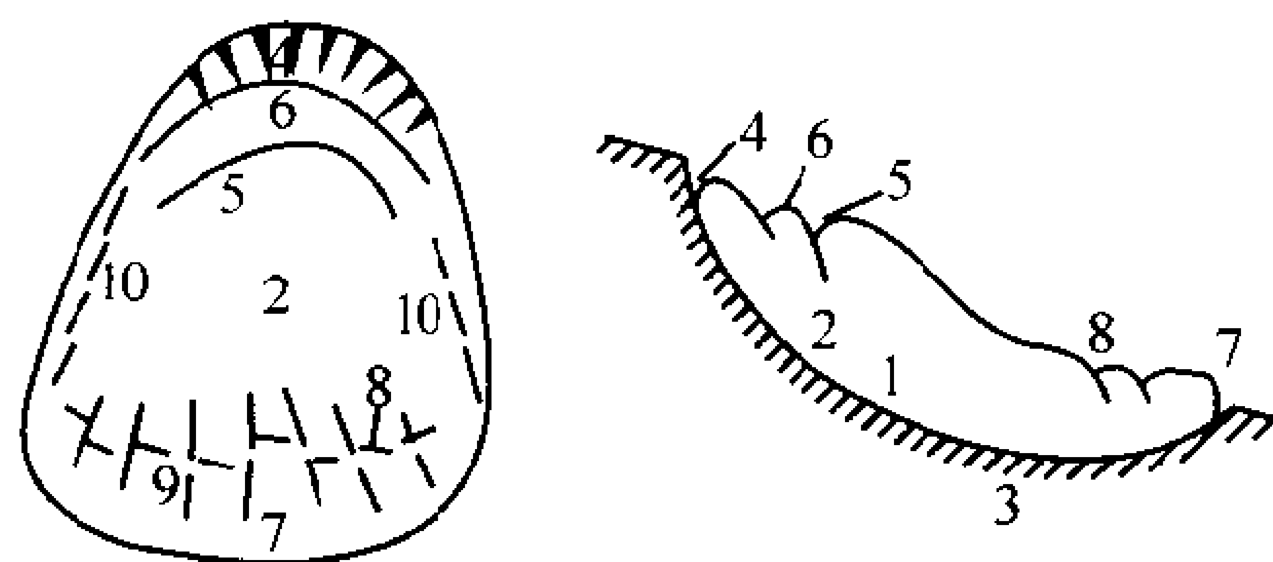


图 071-1　滑坡结构图解

1. 滑动面；2. 滑坡体；3. 滑床；4. 滑坡后壁；5. 后缘张裂缝；6. 滑坡台阶；7. 滑坡舌；8. 鼓张裂缝；9. 扇形张裂缝；10. 剪切裂缝

滑坡一般发生在以粘土质为主的土层或泥质岩及其变质岩中。滑动面大多沿岩层面、破裂面或透水层与不透水层之间的界面发育。冲刷形成的陡岸或人工开挖的陡坎最易形成滑坡。地震、降雨和融雪等是诱发滑坡的重要因素。滑坡的形成过程，从初期的岩土体缓慢蠕动到快速滑动，一般需较长时间，有的历时几个月或几年，但也有突然暴发的滑坡。滑坡滑动速度通常较缓慢，但滑动中可出现短时间的剧滑，速度可达每秒几十米。

据有关研究（马宗晋等，2000），我国每年因滑坡造成的经济损失在10亿元左右。产生滑坡的原因除山高、坡陡、岩石破碎及暴雨、地震等自然因素外，重要的原因还是人类违反自然规律的非科学活动，如不注意节制人类活动，将会隐伏更大的滑坡隐患。

泥石流：是突然暴发，历时短暂，含有大量泥沙、石块等，并具有强大破坏力的固液两相流。泥石流中的固体物质大多超过15%，最高可达80%，容重一般大于1.5t/m^3。形成泥石流的三个基本条件是：1. 地势陡峻，山高沟深，流域面积大；2. 有丰富的固体碎屑物质；3. 在短时间内有充沛的水量。流速通常为5～7m/s，最大时可达70～80m/s。

泥石流按流体性质分为粘性泥石流和稀性泥石流。前者是典型的泥石流，固体物质含量高达40%～60%，容重2t/m^{3}以上，



泥浆粘度在10P（泊）[1] 以上，流态为半紊乱－似层流，又称层流性泥石流，巨大岩块可浮托运动，具有侵蚀和搬运能力；后者固体物质含量少，为15%～40%，容重1.5～1.8t/m^3，泥浆粘度小于5p（泊），流态为紊乱－半紊流，又称紊流性泥石流，石块搬运呈滚动—跃移方式，对河床的下切作用较明显。

泥石流发生时山摇地动，来势凶猛，破坏性极强。据初步统计，我国有70多座城市、460多个县城受到泥石流威胁。泥石流高发区是四川、云南、陕西的黄土高原以及秦岭山地等。发生泥石流最多的江河流域是长江和黄河的中上游流域。

地面沉降：是地壳表层大面积土体或岩体因压缩而导致区域性地面相对周围下沉、标高降低的一种地质现象。如果是局部地面沉降，形成一个盆状区，此为塌陷。地面一旦沉降和塌陷，则地表水就会向这里汇聚，穿过这里的河流也会因自然排水不畅使泄洪能力减弱而导致洪涝。如果水里含盐分较高，日积月累，土地就会盐碱化，同时地面下沉必然导致其上的大型建筑物（水坝、桥梁等）地基失稳、变形、裂缝等，此外如地面沉降发生在海滨则会导致海水倒灌，使土壤盐碱化、沼泽化。

引起地面沉降的原因，据调查在我国主要是人为因素，主要由于过量抽取地下水，以及不合理开采地下石油（天然气）开采煤资源所引起。目前世界上已有50多个国家和地区发生地面沉降，比较严重的有美国、日本、墨西哥和意大利等。我国已有20多个城市发生地面沉降，比较严重的是天津、上海、北京、西安、台北、常州、苏州、宁波、嘉兴、太原等，天津塘沽和汉沽沉降速率最大为186mm/a。由于不均匀的沉降还会发生地裂缝，现在全国已有300多个县（市）共发现地裂缝1000多处，仅西安市因地裂缝每年就损失上亿元。

---

① 1P（泊）＝0.1Pa·s。

水土流失：土壤和土体在水力（风化和重力）作用下被冲刷及吹失超过允许侵蚀量时称水土流失。水土流失允许侵蚀量的大小以土壤侵蚀速度不超过成土速度为准。成土速度大约为0.833mm/a，相当于180t/(km^2·a)。衡量侵蚀量的单位一般用侵蚀模数〔t/(km^2·a)〕来表示。水土流失是一种高频率低能灾害现象，被列为世界第1号环境问题，它使世界耕地以每年0.75～1.05亿亩[①]的速度在丧失。我国水土流失很严重（北方主要是黄土高原，南方主要是红土分布区），据初步统计全国水土流失面积已扩展到了$1.5\times10^6km^2$（其中黄河流域为$54\times10^4km^2$），接近全国土地面积的1/6，每年流失土壤50亿t。水土流失使土层变薄、土地贫瘠、土壤干燥、地形破碎、农田大幅度减产。从历史上看，水土流失与人类大肆开荒，与林草争地、毁林毁草有关。森林、草原减少了，水土流失增加了，如此年复一年，便形成了像我国西部陷入的“越开越穷，越穷越开”的恶性循环怪圈。水土流失除破坏土地、减少耕地外，还会造成江河、湖泊和水库的淤浅，还会污染水质，使生态环境恶化，形成沙漠。

石漠化：石漠化与沙漠化相反，沙漠化的结果，给人们带来的是沙暴、尘暴和沙尘暴，而石漠化则造成严峻生态环境问题，因为石漠化的结果使地表几乎全变为裸露岩块（岩石）的荒漠，即漫山遍野是光秃秃的石头，基本上没有植被。石漠化主要发生于我国西南的滇、黔、桂等省区，据最近统计，石漠化速度为2500km^2/a，这个速度并不比沙漠化速度慢。石漠化的危害并不亚于沙漠化。



沙化、沙尘与沙尘暴

沙化即沙漠化，指非沙漠区出现的以风沙活动为主要特征，

① 1亩$=6.66667\times10^2m^2$。

类似沙漠的环境改变过程。联合国环境规划署的解释是，在一定沙物质基础和干旱大风的动力条件下，由于过度人为活动与资源环境不相协调发展所产生的一种以风沙活动为主要标志的环境退化过程。20世纪70年代以来，全球沙漠化日趋严重，据统计，全球每年约有600万 km^2 土地变为沙漠。目前全世界有90多个国家受到沙漠化的侵害，我国也是受沙漠化侵害最为严重的国家之一。20世纪50年代我国沙漠平均扩展为1560 km^2/a，到了90年代则达到了2460 km^2/a。此外我国也是沙漠、戈壁分布最广的国家之一。沙漠即砂质荒漠，戈壁即难生草木的土地。由沙漠和戈壁组成的沙带，呈弧形展布于东经75°~125°和北纬37°~50°之间，西起新疆喀什噶尔，东到辽河流域，东西长4000km，南北宽600km，总面积为128万 km^2，分属于三个互有联系的自然区，即温带干旱荒漠区、温带半荒漠区及温带半干旱草原区。温带干旱荒漠区主要分布在乌鞘岭、贺兰山以西，包括塔里木、准噶尔及柴达木盆地中的沙漠；温带半荒漠区主要分布于贺兰山与温都尔庙一定边一线之间，包括库布齐沙漠及宁夏河东沙漠等；温带半干旱草原区主要分布于温都尔庙一定边一线以东，包括毛乌素沙地、浑善达克沙地及科尔沁沙地等。我国北方9省（区）沙漠（戈壁）面积如表072－1，可知：新疆沙漠面积位居全国第一，依次为内蒙古、青海、甘肃、陕西、宁夏、吉林、黑龙江及辽宁。除沙漠外，全国还有约 $15.8\times10^4km^2$ 土地存在着潜在沙化的危险，涉及11个省区（上述9省区加河北及山西）的212个县（旗、市），近400万 hm^2 的旱农田和500万 hm^2 的草场。沙漠化与沙漠不同。沙漠是干旱气候和丰富沙源的产物，沙漠化则不限于干旱地带，半干旱和半湿润地带都能出现；在成因上沙漠发生在第四纪，而沙漠化则是发生在现代；在发展趋势上，沙漠一般难于自然逆转，而沙漠化则在消除人为干扰因素后还有恢复的可能，因为沙漠化是人与自然之间不协调发展的结果。

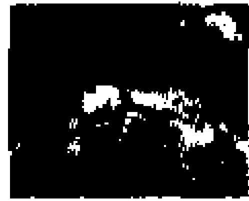


表 072－1　　我国北方9省区沙漠、戈壁面积表

省　区	$\times 10^4 km^2$			占全国陆地总面积（%）
	总面积	沙　漠	戈　壁	
新　疆	71.3	42.0	29.3	7.4
内蒙古	40.1	21.3	18.8	4.2
青　海	7.5	3.8	3.7	0.8
甘　肃	6.8	1.9	4.9	0.7
陕　西	1.1	1.1	0	0.1
宁　夏	0.65	0.4	0.25	0.07
吉　林	0.36	0.36	0	0.04
黑龙江	0.26	0.26	0	0.03
辽　宁	0.17	0.17	0	0.02
合　计	128.24	71.29	56.95	13.36

注：引自韩茂莉等，2002.

关于沙尘的划分，按照气象学者研究，有三个等级，即浮尘、扬沙和沙尘暴。浮尘是指无风或风力较小，细沙均匀地浮游在空中，水平能见度大于10km；扬沙指风力较大，将地面沙尘吹起，空气相当浑浊，水平能见度在1～10km；沙尘暴则指风力强大，能将地面大量沙尘卷入空中，空气特别浑浊，水平能见度小于1km。沙尘暴强烈时风速可大于25m/s，风力10级以上，水平能见度小于50m，破坏力极大。可见沙尘暴不同于单纯的大风天气。北非的撒哈拉、北美中西部、澳大利亚中部、中亚等地都是沙尘暴多发区，我国西北及中蒙边境也是多发区。上述地区风沙之多，并非始于今天，可以说自古就有，那么为什么在当今世界会如此频繁出现扬沙和沙尘暴呢？沙从何来，祸起何方？这一系列问题正改变着人们对沙漠及沙漠化的环境忧虑。对此，学者们的答复是，沙尘天气的周期性变化虽是沙尘暴陡增的原因之一，但我国西北地区地表整体覆盖恶化则是另一重要原因。据统计，随着沙化土地面积的逐年增加，沙尘暴的频数亦不断增加。



20 世纪 50 年代沙尘暴平均为 0.5 次/a，60 年代为 0.8 次/a，70 年代为 1.3 次/a，80 年代为 1.4 次/a，90 年代为 2.3 次/a，到 2000 年则陡增到 12 次/a。从地区气象台（站）的观测记录来看，在这一时期，风力变化不大，只是有助于风沙活动的裸地剧增，在同等风力条件下而更有利于扬沙及沙尘暴活动的结果。

我国北方沙尘暴及扬沙的沙源地，经学者们（杨根生等，2001）多年考察认为，主要有 4 个地区：1. 河西走廊—阿拉善区，这是强度最大的沙尘暴策源地；2. 陕蒙宁晋长城沿线沙荒地区；3. 浑善达克—呼伦贝尔—科尔沁沙区；4. 塔里木盆地边缘区。这 4 大沙源地扬沙物质十分丰富，近 50 年来，年发生沙尘暴次数均在 15 次以上，其中至少有一次强沙尘暴天气。2001 年国家环保局等部门联合考察后则认为我国西路、西北路沙尘暴的沙源区为环绕腾格里沙漠及巴丹吉林沙漠的周围地区，而影响我国西北沙尘暴的沙源区主要有西路、西北路、北路三股沙尘暴。西路从巴尔喀什湖翻越天山、帕米尔高原至南疆，东移出塔里木盆地到玉门、西安地区；西北路从西西伯利亚越新疆向西至甘肃河西地区；北路经河西走廊穿越内蒙古草原出境。以上都是远距离或较远距离的沙尘暴策源地，对我国沙尘暴的形成和发展虽有深远影响，但学者们普遍认为，飘行万里刮到华北，特别是刮到北京的沙尘，并非来自沙漠腹地，而主要是来自沙漠边缘正在沙化的土地。当冷空气越过阴山北麓南下时所经过的是农牧交错的地区，也是植被退化、草场沙化最为严重的地区。这些正在沙化的土地为大风扬尘提供了足够的沙尘，使扬沙一路加强，并最终形成了袭击华北广大地区的沙尘暴。

沙尘暴这一过去只在气象学和地学界言及的概念，现已变成了家喻户晓的名词，并已写入通俗歌曲“铺天盖地的沙尘暴”中而加以传唱，这表明沙尘暴的肆虐惊醒了人们的环境意识！人类属于地球，但地球决不仅仅属于人类。人类社会的发展应是遵循

地球自然规律的和谐发展，人类中心主义的价值观在自然界是行不通的。

073 黄河断流的呼唤

黄河被誉为中华民族的母亲河，在历史上虽然也曾因大旱发生过断流，但很快就得到了恢复。然而自20世纪70年代以来断流现象日趋严重，从1972年至1999年的28年间，黄河下游共22年发生断流，特别是从20世纪90年代中期以来，几乎每年断流（表073－1，表073－2）。不仅断流时间越来越长，而且断流时段也有增加，如严重断流的1997年，山东利津水文站全年断流13次，断流天数226d，河口断流长达290d，330d无河水入海，也就是说，1997年内80%的时间断流，断流最大距离704km，断流起点从下游河口可一直上溯到河南开封的柳园口（叶青超，1998），并首次跨年度断流，这意味着如今的黄河已变成了一条间歇河了，且基本无河水入海，这是世界大河史上所罕见的。尽管世界其他大河，比如尼罗河、印度河以及美国的科罗拉多河等都有入海水量减少的实例，但可以说我国黄河是受人类活动影响改造得最强烈的一条河（任美锷，2002）。

表073－1　　山东利津水文站黄河断流表

年度	断流天数(d)	断流长度(km)	年度	断流天数(d)	断流长度(km)
1993	60	278	1996	136	579
1994	74	308	1997	226	704
1995	122	683			

资料来源：钱正英，1998.

表073－2　　山东利津站黄河径流量变化表

年　度	1950～1959	1960～1969	1970～1979	1980～1989
年径流量（$\times 10^8 m^3$）	494	513	304	291

注：引自任美锷，2002.

造成黄河断流的客观条件是，黄河的大部分流域处于干旱半干旱地区，虽然流域面积并不小，约为长江流域面积的42%，但河水流量较小，仅为长江的6%，加之近年来天气异常，气候干旱，年降雨量平均为470mm，河南花园口以上的中上游流域平均降雨量比正常年份减少了12%，但这并不足以引起黄河下游断流，因为历史上的气候干旱时期，虽然年降水量也有减少，其支流，比如汾（河）、沁（河）、漳（河）等河也多次断流，晋西黄河干流也有断流，但并没有引起黄河下游长河段、长时间的断流。20世纪20~30年代，黄河天然径流量减少了34%，下游也并未断流，然而到了90年代径流量仅减少了19%，下游却发生了严重断流事故，这是母亲河两岸的不肖子孙贪得无厌地吮吸的结果。

农业灌溉用水取用量占黄河总用水量的90%~92%，据统计，20世纪50年代的年灌溉耗水量为122亿m^3，90年代增加到了300亿m^3，黄河下游更甚，由50年代的19亿m^3增加到了90年代的108亿m^3，如山东东营市的取水量，1984年为6亿m^3，1994年增到15亿m^3，增长了1.5倍。目前黄河供水区总引水能力为6000m^3/s，是黄河年平均天然流量1839m^3/s的3.3倍，沿黄河两岸200km^2以上灌区引水能力为3100m^3/s，是平均天然流量的1.7倍，都远远超过母亲河所能负担的供水能力。但这还不是问题的实质，严重的问题是在引黄河水中存在着巨大的水资源浪费。由于灌溉设施落后，管理粗放，基本上是大水漫灌，耗水量过高，利用率过低（还不到取水量的1/4)。此外灌溉取水与黄河流水季节不相适应。当上游与下游灌溉不能同时进行时，上游便采用“春旱冬蓄”等提前引水措施，增大了冬季引黄水量，使下游断流更加严重。

工业用水：与农灌用水一样，工业及城市用水也普遍存在着严重浪费问题。黄河流域大中城市工业万元产值（以1980年为

不变价）耗水量为300～500m^3，不仅高于世界先进国家平均水平（高出7倍以上），而且也高于全国平均水平（高出1.7～2.9倍）。再者黄河中游是我国化石能源的重要产区，神（木）府（谷）煤田、东胜煤田、河东煤田的建设，坑口火电建设，以及陕北、内蒙古苏格里大气田的开发建设，目前及未来大量用水都取自黄河。此外在黄河岸边的城市也在引用黄河水，如山东的济南（引黄保泉）、青岛（引黄济青）、淄博、潍坊、烟台，内蒙古的呼和浩特，河北的沧州（引黄济冀），山西的太原、大同、朔州（引黄入晋）等，虽然引黄（河水）对这些城市的社会经济比较有利，但只引不输，引水利用率，特别是重复利用率也不高，这就更加重了黄河断流的严重程度。

专家们认为，至少在21世纪初期，黄河下游缺水断流现状难以得到改善，因为一方面黄河上游引水量还在增加，另一方面黄河水量在近期内又难以增加。黄河要增加水量，只能从外流域调水（任美锷，2002），主要是西线南水北调工程，年可引水量约$200\times10^8m^3$，但工程复杂，投资巨大。目前比较现实的办法就是从现在起要千方百计地节约黄河用水，特别是节约灌溉用水，采取科学灌溉方法，千方百计地增加黄河水量，如此则可能缓解黄河断流的燃眉之急。

美国科罗拉多河（其重要性远不如黄河）曾因上游筑坝拦水而无河水入海，当时的美国内务部长B.Rabbitt曾大呼，这是美国的羞耻。黄河是我们的母亲河，而如此连年断流，无河水入海，如果任其下去，将会逐渐萎缩，以至死亡，这难道不是我们中华民族的奇耻大辱吗？

074 地震活动：基本名词和概念

1. 震源和震中：地震时地下深处发生地震的地区称震源，简言之即发生地震的地方，是地震能量聚集、释放和地震波产生

的源头（F），也称震源区；地面上某点到震源的距离称震源距 R（图 074－1），震源正对地面的那一点，即震源 F 在地球表面的投影 E 称震中，也称震中区，C 为观测台站位置，距离 EC 称为震中距离 Δ，从震中 E 到震源 F 的垂距称震源深度（h）。当地震发生时，自 F 点发生纵波（P）和横波（S）。假如介质是均匀的，P 和 S 可沿直线到达观测站 C。人们总是采用最先到达的 P 波和 S 波来测定震源的位置，显然这并不是整个震源区域。按震源深度 h 可将地震划分为浅源地震（0～70km）、中源地震（70～300km）及深源地震（300～700km）三类。我国绝大部分地震都是浅源地震，地震危害较大。

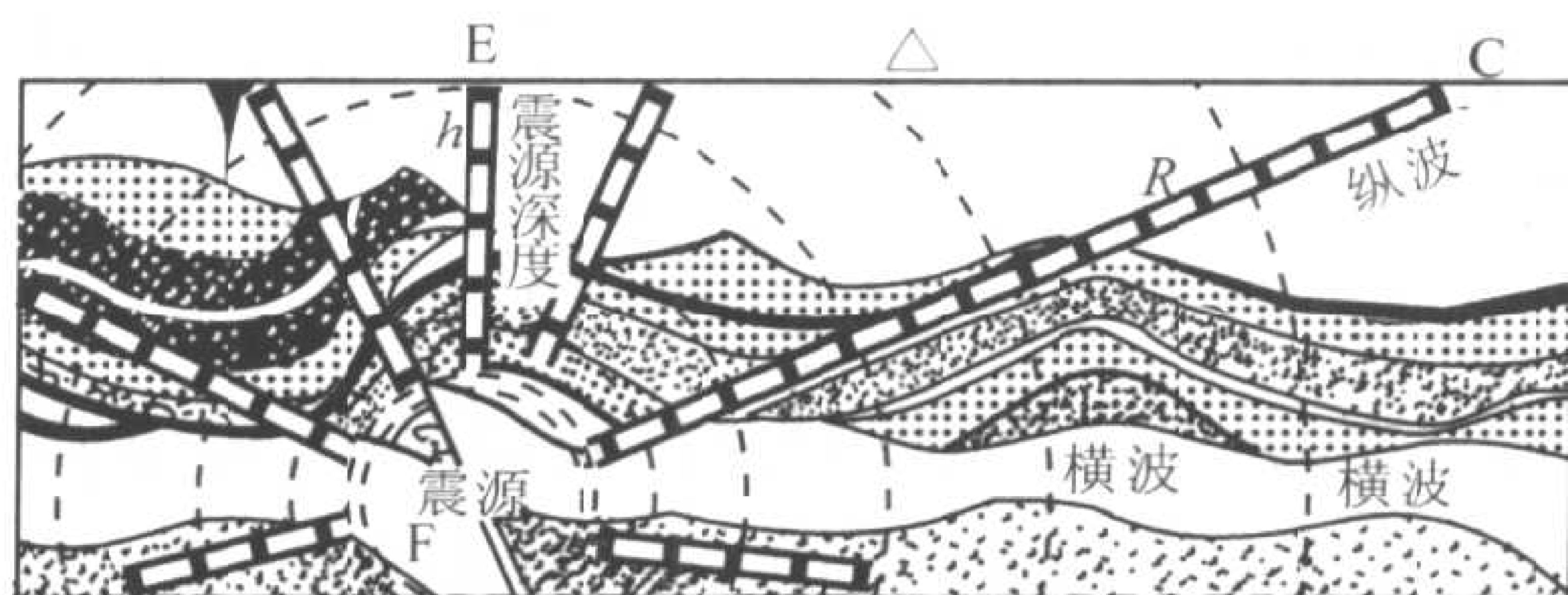


图 074－1　地震基本名词图解

地震的影响范围和地面受地震影响的破坏程度与震源深度有密切关系。震中及其附近区域，由于距震源近，振动最为强烈，所以破坏最为严重。地震学家把受地震破坏最为严重的地区称极震区。地震发生后追寻到极震区也就找到了震中位置。习惯上用这个地点定义这次地震的名称，如唐山地震、邢台地震、海城地震等。震中的具体位置用经纬度表示，如唐山地震的震中位置是 118°11′E，39°38′N。距震中越远即 Δ 越大，受地震波及的程度越小。震中距（Δ）超过 1000km 的称远震，Δ 为 1000～100km 的称近震，Δ 小于 100km 的称地方震。如唐山地震时对天津而言是地方震，对北京而言是近震，而对上海则是远震。震中距（Δ）也常以地面距离对地球球心所张开的角度（圆心角）表示，Δ 大于



105°时称极远震。显然对极远震和远震毋需加以防范，对地方震则需高度警惕。

2. 震级、烈度和灾度：三者都是描述地震及其危害程度的指标。

震级：是一次地震中地壳释放能量的测度，震源释放的能量越多，震级就越大。按照弹性波理论，其波动量可用振幅大小来衡量，因此震级可用地震仪上记录到的最大振幅来测度。最初是按距震中100km处标准地震仪（伍德-安德逊式地震仪）所记录的最大振幅值（以μm为单位）的对数值来测算的，如地震仪记录到某次地震的最大振幅为10mm，即10 000μm，其对数值为4，即4级地震。以此为基础，建立了震级（M）和地震总能量（E）的关系式：

$$\log E = 11.8 + 1.5M$$

式中E的单位为焦耳（J），应用这个关系式便可求出震级M和其相应地震总能量E。一次强烈地震所释放的总能量是十分巨大的，1次8.5级地震的能量是3.6×10^{17}J，相当于100万kW的大型发电厂连续10年发电量总和。我国唐山地震（7.8级）释放的总能量相当于400颗广岛原子弹（2万吨级）的能量和。震级与能量是对数关系，所以0级地震释放的能量不等于零，震级相差1级，能量相差约32倍，1级地震释放的能量为2×10^{6}J，2级为6.3×10^{7}J，三级为2×10^{9}J……1个7级地震约相当于32个6级地震的能量，相当于1024个5级地震的能量，而5级地震释放的能量约相当于2万吨级原子弹爆炸的能量。由于两相邻震级能量相差悬殊，故在实际应用中震级用小数位表示。

地震释放能量小于6.3×10^{4}J的地震为负数级震级，高灵敏度地震仪能记录到震级小于-2级的地震，而一般地震仪则只能记录到微震即小于3级的地震，而大于7级则称大震，全球地震释放的能量绝大部分来自大震。迄今为止，全球记录到的最大地

震为 1960 年 5 月智利海边发生的智利大地震，震级为 8.9 级。

我国一般按震级（M）大小将地震划分为 6 个等级：小震（$M<3$），有感地震（$3<M<4.5$），中强地震（$4.5<M<6$），强烈地震（$6<M<7$），大地震（$7<M<8$）和巨大地震（$M>8$）。全球绝大多数地震，只有靠仪器才能观测到。

烈度：是地震的震动剧烈程度和破坏程度的测度。同一震级，不同地区受地震影响的破坏程度不同，故烈度也不同，受地震破坏越大的地区烈度也越大。将地震时所常见的现象（标志），按照它们所反映的震动强弱，分成几个大类，并顺序以数字表示，就构成一个烈度表。有 12 度表、10 度表和 7 度表（日本）几种，以 12 度表较普遍，我国采用 12 度表。12 度表是 1964 年国际地震学和地震工程学会议所制定的国际通用的烈度表，其简单表达为：Ⅰ度无震；Ⅱ度微有感；Ⅲ度少有感；Ⅳ度多有感；Ⅴ度惊醒；Ⅵ度惊慌；Ⅶ度房屋损坏；Ⅷ度建筑物破坏；Ⅸ度建筑物普遍破坏；Ⅹ度建筑物普遍摧毁；Ⅺ度毁灭；Ⅻ度山川易景。

地震烈度与地震震级不是简单的一一对应关系。震源深浅也影响烈度（表 074－1）。一般震中所在地区为当次地震烈度最高区，随着震中距离增加，烈度总的趋势在降低。

表 074－1　　震中烈度与震级、震源深度关系表

震级 / 烈度 / 震源深度（km）	2	3	4	5	6	7	8
5	3.5	5	6.5	8	9.5	11	12
10	2.5	4	5.5	7	8.5	10	11.5
15	2	3.5	5	6.5	8	9.5	11
20	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5
25	1	2.5	4	5.5	7	8.5	10

地震灾度是近年来发展起来的一个新概念，主要是指地震灾害中经济、人畜的损失程度。

地震除主震外还往往包含有前震和余震，有时候余震与主震震级并没有显著差别，这时余震就会造成二次灾害。值得注意的是并非所有地震都有前震和余震，没有前震的较大地震给人类带来的灾害往往更大。

075 全球地震活动带

地球上到处都会发生地震，据统计，地球每年发生的地震达350万次之多，但不是到处都会发生大地震；地球上每天都有地震，但不是每天都有大地震。有的地震强烈到可以地动山摇、房倒屋塌；有的地震则极其轻微，以至单凭人的感觉器官感觉不出来。小地震的时空分布规律不甚明显，但较强地震，特别是强地震的时空分布则规律性明显，均呈带状分布，称地震活动带，简称地震带。从全球范围看，大多数地震分布在三个呈条带状分布的地带，即环太平洋地震带（海沟系统）、欧亚地震带（碰撞造山带系统）和海岭地震带（大洋中脊系统），以前两个地震带最为重要。据统计，全球90%以上的地震能量都在环太平洋地震带及欧亚地震带释放。海岭地震带（大洋中脊地震带）是浅源地震多发地带（图075－1）。

环太平洋地震带：全球大多数地震都密集分布在太平洋周围，是最大的地震带，其长度达35 000km，北起太平洋北部的阿留申群岛，分东西两支沿太平洋东西两岸向南延伸。东支沿途是纵贯南北美洲的巨大山脉科迪勒拉山系，山系西侧的海洋内有水深超过6000m的深邃海沟，如阿留申海沟、中美海沟、秘鲁—智利海沟，山系陆地一侧有绵长的活动断层（断裂带），如阿拉斯加断层、圣安德列斯断层、阿塔卡玛断层，同时有众多的活火山，如哥伦比亚鲁伊斯火山、美国圣海伦斯火山等。大地震活动



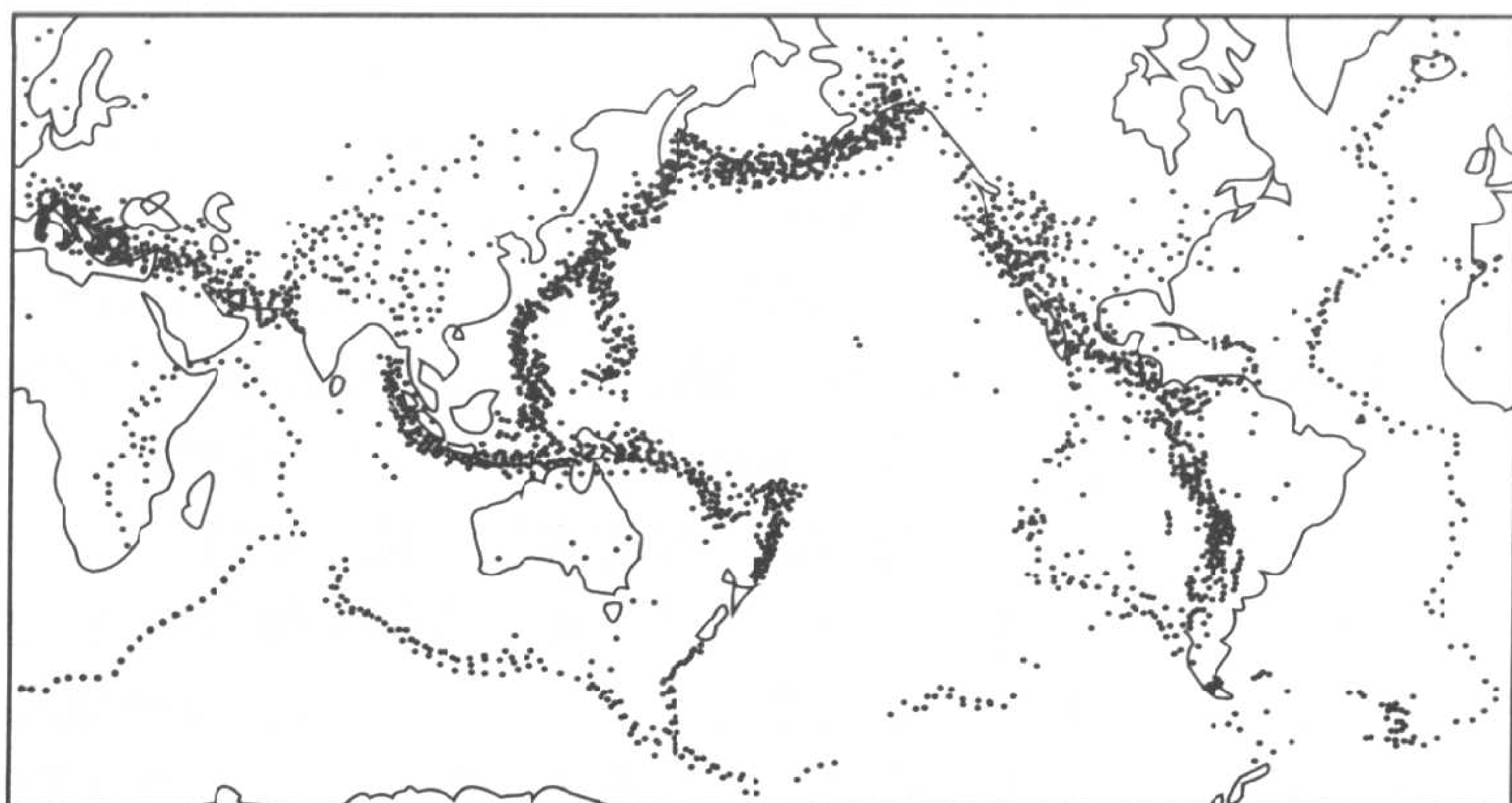


图 075 – 1　全球大地震震中分布图

（G. A. Eiby，1980）

图中黑点为 1962 ~ 1967 年全球浅源和深源地震

的震中位置，其他时期的震中位置与此相似

频繁，北段阿拉斯加 1958 年发生过 8.0 级、1964 年发生过 8.4 级地震；中段自美国加利福尼亚至墨西哥，近百年来发生 5 级以上地震达 26 次之多，旧金山 1906 年发生过 8.3 级、1989 年发生过 7.1 级地震，洛杉矶 1964 年发生过 6.6 级地震，墨西哥 1985 年发生过 8.1 级地震；南段的智利大地震反复发生，1960 年发生的 8.9 级地震为迄今全球最大的地震，大震搅动了整个太平洋，摇动了整个地球。西支经千岛群岛、日本群岛、琉球群岛、我国台湾岛、菲律宾群岛，向南绕过澳大利亚至新西兰与南太平洋相接。西支与东支的不同之处在于它不是巨大的山系，而是一系列颇具特色的弧状群岛（东亚岛弧）。每一条岛弧链边缘都伴随着一条深海沟，岛上火山群发育，日本岛上的富士山、我国台湾岛上的七星山都是活火山，菲律宾和印度尼西亚近年来也都有火山喷发。地震活动强烈，以日本为例，历史上仅日本岛所发生的大

地震就达2000多次，近400年来，东京曾9次毁于地震，1923年关东8.3级大地震，1995年阪神7.2级大地震都是地震灾害史上的新记录。菲律宾群岛、印度尼西亚以及我国台湾近年来的破坏性地震不断发生，往往一年数遇，均都表明环太平洋地震带是地球上地震活动最强烈的地带。据统计，全球约80%的浅源地震、90%的中源地震和几乎全部的深源地震都发生在该带内。全球75%~80%地震能量的释放也都发生在这一地震带内。

欧亚地震带：又称地中海—喜马拉雅地震带或阿尔卑斯—喜马拉雅地震带。它西起地中海北岸，经意大利半岛、西西里岛、土耳其、伊朗抵达帕米尔后沿喜马拉雅山东行，穿过中南半岛西缘，直至印度尼西亚班达海以东的伊里安岛与环太平洋地震带西支相接，长达20 000多km。在这条地震带上绵延的山脉主要是阿尔卑斯山、亚美尼亚山、兴都库什山及喜马拉雅山。火山活动以意大利西西里岛最为著名，自公元前475年有记载火山喷发以来至今，已大规模喷发500多次，1999年这一次，其熔岩喷发柱高达200多m。地震活动以土耳其最为频繁，其次是伊朗。1950年我国西藏察隅发生的8.6级地震是该带发生的最强烈地震。据统计，全球约15%地震能量的释放发生在这一地带内。因欧亚地震带与阿尔卑斯褶皱带联系紧密，故也简称为阿尔卑斯地震带，它始于地中海北岸，所以有时也称此带为地中海地震带。

海岭地震带：又称大洋中脊地震带，在大西洋、印度洋、东太平洋、北冰洋和南极洲周边的海洋中成带分布着许多中小地震的震中，这一震中分布带绵延达60 000km，与大洋中脊位置吻合，故也称大洋中脊地震带。在大洋中脊地震带上的地震震级一般不超过7级，震源也较浅。全球约5%的地震能量在这一地震带内释放。

那么为什么全球大多数地震活动都发生在以上三条地震带内？学者们的答复是，主要与相互作用的板块边缘活动有关，也

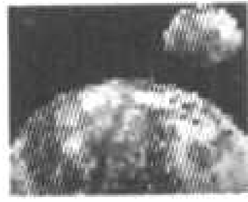


就是说，板块的相互作用是地震的基本成因（陈运泰，1997）。板块之间的相对运动使得在其边缘积累了应力，应力的快速释放导致地震的发生。

在中等深度或较深处，岩石层板块的相对滑动比较均匀和连续，但是在浅处（0至20~30km处）岩石层板块的相对滑动则是一种叫做粘滑的滑动，即它的滑动过程是在经过一段时间的弹性应变积累之后的突然滑动，这种突然滑动就是地震。浅源地震集中于板块边缘，是板块相对运动的反映，中源和深源地震主要与海沟关系密切，它通常发生于从海沟内侧向大陆一侧的倾斜（倾角约为45°）面内，这个面的深度可达几百千米，但厚度只有几十千米，最薄的地方可小于20km，叫做深源地震面。当板块可能俯冲到650~700km处时，它或者被地球岩石所吸收，或者其性质发生变化，以至不再释放出地震能量，所以700km以下的深源地震目前尚不多见。

发生于相互作用板块边缘的地震称板间地震。板间地震包括洋中脊（裂谷带）地震、俯冲带地震、转换断层地震和碰撞带地震。发生于板块之内的地震称板内地震，也称内陆地震。板内地震是在板块相互作用的影响下，由比较局部的力系或由表层岩石的温度、深度和强度的变化所引起。我国大陆内部的大多数地震均为板内地震。

地震都发生在岩层或岩体中，因构造运动变形时，能量以弹性应变能的形式贮存于岩石中，直至在某一点累积的形变超过了岩石所能够承受的极限时发生断裂，产生地震断层。地震断层的存在是发生地震的必要条件。地震断层破裂时，断层面相对着的两盘各自弹性回跳到其平衡位置，贮存在岩石中的弹性应变能便释放出来，释放出来的应变能一部分用于克服断层面的摩擦（转化为热能），另一部分用于使岩石破裂，还有一部分则转化为使大地震动的弹性波振动能，于是地震就发生了。



076 中国地震活动的时空分布

我国处于太平洋板块、欧亚板块和印度板块的汇聚中心，全球两大地震带，即环太平洋地震带与欧亚地震带都经过我国，因而地震活动频繁而广泛（图 076－1）。除吉林珲春有深源地震外，其他地区的地震大都为发生在地壳内部的浅源地震，以 5～20km 深度者占绝大多数。据统计，大地震主要分布于 5 个大区及 15 个地震活动带。5 个大区是：1. 台湾省及邻近海域；2. 西南（西藏、四川、云南）大区；3. 西北（新疆、甘肃、宁夏）大区；4. 华北（北京、天津、河北、山东、山西、陕西）大区；5. 东南沿海（福建、广东、广西）大区。15 个地震活动带如下。

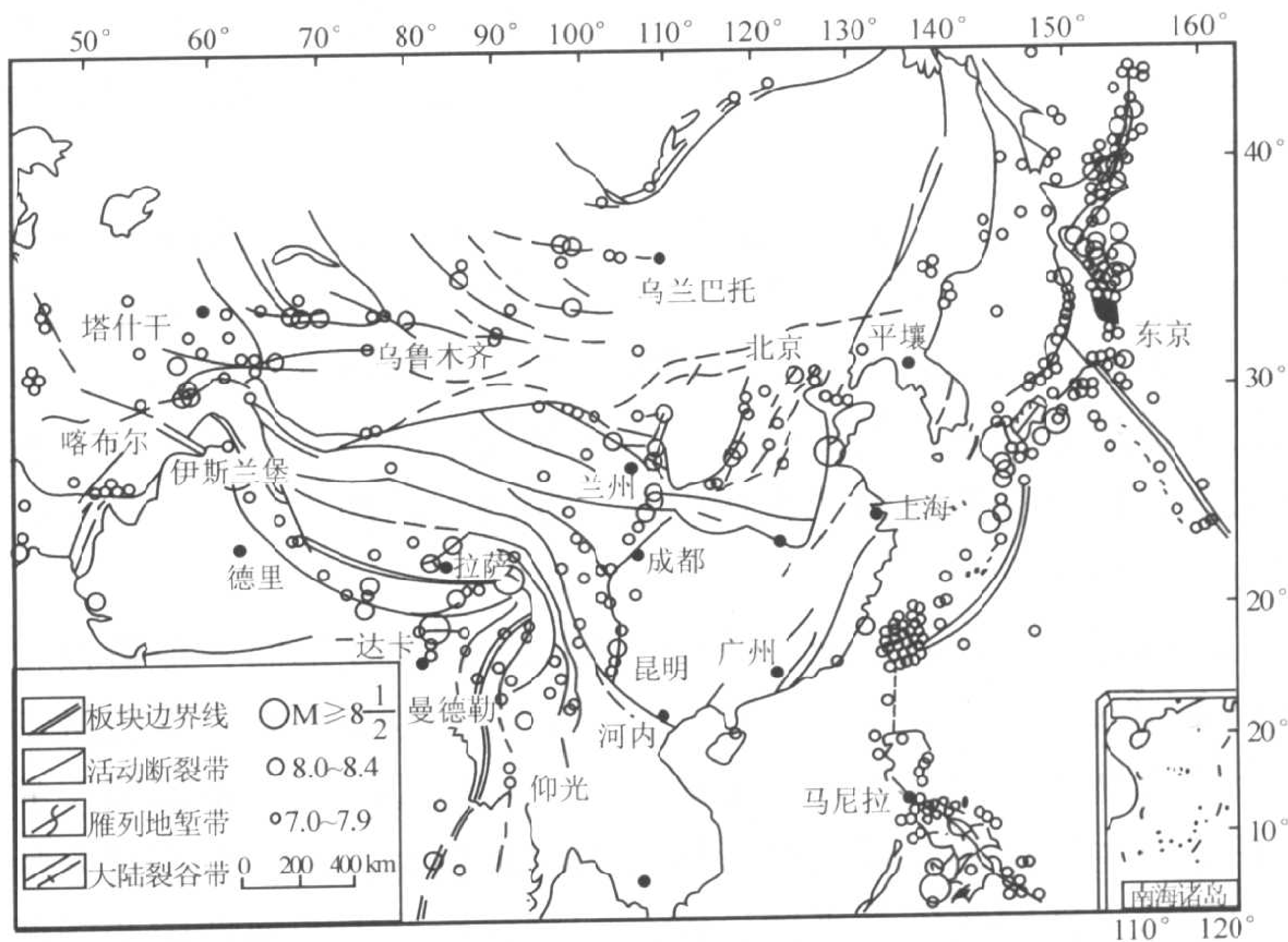


图 076－1　中国大陆及邻区强震震中分布图
（傅征祥，1997）

郯城—庐江地震带：即郯庐断裂带，北起辽宁，经渤海、山东至安徽庐江，长达1000km。历史上郯城—莒县间发生过8.5级地震，1975年辽宁海城地震为7.3级。

华北平原地震带：包括东西向分布的燕山带和北东向分布的河北平原带。历史上该带三河—平谷间发生过8.0级地震，磁县发生过7.5级地震，1966年邢台（宁晋）发生过6.8级和7.2级地震，1976年唐山地震为7.8级。

汾渭地震带：即汾渭地堑系（汾渭裂谷），包括汾河带和渭河带。历史上洪洞—赵城间、临汾—襄汾间都发生过8.0级地震。近年的地震记录是1989年大同—阳高间的6.1级地震。

贺兰山—六盘山地震带：是我国南北向地震带的一部分，地震活动频繁，强度较大。历史上银川—平罗间发生过8.0级地震，中卫—中宁间发生过7.5级地震。20世纪的地震记录是1920年宁夏海原发生的8.5级大地震，它摧毁了海原、固原等4座城市，此地震也是我国西北地区迄今所发生的最强地震。

塔里木盆地南缘地震带：主要由昆仑山山前大断裂所组成。20世纪的记录是1924年和田发生过7.2级地震，1996年喀喇昆仑发生过7.1级地震。

河西走廊地震带：地震活动强烈而频繁。1927年古浪发生8.0级地震，1932年昌马发生7.5级地震，1954年山丹发生7.0级地震，1990年天祝发生6.2级地震，1996年发生5.4级地震。

天水—兰州地震带：是我国东西向构造和南北向构造的交接地带，地震活动性较强，历史上陇西曾发生过8.0级地震。

武都—马边地震带：历史上武都发生过8.0级地震。20世纪的地震记录是：1933年迭溪发生过7.5级地震，迭溪地震造成了岷江干支流的串串湖泊；1976年松潘发生7.2级地震。

康定—甘孜地震带：位于大渡河以西，与川藏公路走向一致。1955年康定7.5级，1967年炉霍6.8级，1973年7.9级，

1975年九龙6.2级，1981年道孚6.9级，1982年甘孜6.0级，1996年白玉5.5级，地震活动相当频繁。

安宁河谷地震带：沿安宁河经西昌至攀枝花附近。据西昌地震碑林记载，历史上西昌地区发生过7.3级、6.8级及7.5级三次大地震。

滇池地震带：包括滇东和滇西地震带。滇西地震带以苍山洱海为中心。这个地震带历史上曾发生过几十次6级以上地震。20世纪的地震记录是：1970年通海7.7级地震，1924年大关7.1级地震（滇东），1925年大理7.0级地震，1996年丽江7.0级地震，其间中甸、剑川等地还数度发生6级以上地震，均对滇池风光造成了巨大损害。

腾冲—澜沧江地震带：该带近期发生的大地震是1976年龙陵7.4级地震，1988年澜沧—耿马7.3级地震，1995年孟连7.3级地震。

雅鲁藏布江地震带：包括西藏中部及西藏察隅地震带，是欧亚地震带的一部分，属印度板块与欧亚板块的缝合地带。1951年当雄发生8.0级地震，1950年墨脱—察隅发生8.6级地震。察隅地震是迄今我国境内所发生的强度最大的地震。

天山地震带：20世纪以来北天山发生6级以上地震12次，最大的地震是1906年玛纳斯西南8.0级地震；南天山发生6级以上地震20多次，最大的是1902年喀什8.2级地震。从20世纪50年代到90年代这里地震反复发生，影响很大。

东南沿海地震带：包括福建—广东沿海、台湾以及台湾附近海域等。台湾是大中地震频发区，宜兰、花莲、南投、新港等地7级以上地震连绵不断，福建—广东海边也有一系列震级大于7级的强震活动。但内陆则仅有小地震发生。东南沿海地震带是全球环太平洋地震带的一部分。

我国地震分布是不均匀的。据统计，以107°05′E为界，我



国大陆西部和东部地震活动的频次比例为6.7:1。区域上地震带与地震区之间关系密切，地震带通常包括多个地震区，因此，在上述所划定的地震带内并不是处处都会发生地震，因为地震带所反映的主要是地震与构造之间目前所认知的关系。

077 地震灾害

地震灾害是众多地质灾害之首。1976年7月28日凌晨3时42分，唐山突然发生7.8级强烈地震，顷刻之间这座百年古城夷为平地，24.2万人逝于瞬间，震惊了全国，震动了世界！据统计，近百年来与唐山一样，顷刻惨遭毁灭的城市有26座。这种突发性、毁灭性和残酷性是地震灾害的第一大特征。它的第二大特征是破坏面积广大，大地震8度烈度区可达数千至上万平方千米。第三大特征是地震可诱发一系列间接自然灾害，形成灾害链，也就是说，地震灾害具有续发性和多发性。由于地震发生后，以极震区为中心的广大区域处于非常时期，灾区自救和自我恢复能力已基本丧失，抢险救灾主要依靠外部支援，这是地震灾害的第四大特征，即社会性和国际性特征。

随着社会经济发展，社会财富的大幅度增长和城市化水平的进一步提高，地震灾害造成的损失，将会成倍增长，这也是一个全球现象。

1. 直接灾害：指地震发生时，地面受地震波冲击而直接造成的灾害，也就是与地震有直接联系的灾害。

对地面构筑物的破坏：地面构筑物指楼房、厂房、桥梁、水坝、道路、通信设施等建筑物，而建筑物的倒塌和破坏正是造成人员伤亡的主要原因，据统计由建筑物倒塌所造成的人员伤亡约占地震造成人员伤亡总数的95%。地震对建筑物的破坏主要是地震波引起地面振动，地面振动引起建筑物振动，从而产生施加于建筑物上的惯性力（地震力）的结果。P波地震力使建筑物上



下颠簸，S波地震力使建筑物水平摇晃。当地震力超过建筑物的抗震承载能力时，建筑物就被破坏了。建筑物之所以被破坏，主要是水平晃动所造成，因此它的倒塌方向反映水平晃动的方向。若建筑物的东西墙壁倒塌，南北墙壁开裂，则反映此次地震以东西摇晃为主；若是南北方向摇晃，则南北墙壁倒塌，东西向墙壁多被拉断。这种因地震强烈地表振动直接造成建筑物的破坏即振动破坏。此外，地震还能引起建筑物地基的砂土液化。我国江苏溧阳1974年发生的5.5级地震，虽然震级并不大，但以冲积层和湖积层为地基的建筑物，由于地基失效仍然造成了软地基地震灾害（烈度达7度）。1964年美国阿拉斯加8.4级地震，因地下细砂层液化而使地表发生滑动，由此而引起一些建筑物的横移达18m。

对自然环境的改变：地震造成山川易景的自然环境改变现象可以说是司空见惯的，主要有以下几方面。(1) 断裂错动和地裂缝。1970年云南通海地震后地表出现长达50km的大断层，切穿了山林和沟谷，造成了断崖峭壁；唐山地震地面水平位移达1m多；河北邢台地震时，冀县有一条灌溉渠堤坝，原高出地面2m，震后陷入地下2m；辽宁海城地震时强大的地震力使花岗岩山体开裂出宽4m多的大裂缝。(2) 喷沙、冒水。喷沙主要出现在河流两岸，可形成沙锥和沙堤，冒水是因地震变动改变了地下水的储存和径流条件的结果。(3) 土地沉陷。唐山地震时天津市郊一村庄土地沉陷达2.6m，以致池水流入，水深可行船。

2. 次生灾害：指以地震直接灾害为导因的其他灾害。在城市以建筑物倒塌、人员伤亡、火灾等为主；在山区以滑坡、泥石流、水灾等为主；在沿海则以地震海啸等次生灾害为主。

我国是多地震国家，以防震减灾为宗旨的综合防御主要有4个环节：地震监测预报、地震灾害预防、地震应急及地震救灾和恢复重建。

078 地震预测：地球科学的一道世界性难题

地震预测是公认的世界性难题，也是地球科学极富现实意义的科学难题，一直是世界各国地震学家深切关注的焦点。

毋庸讳言，焦点归焦点，但迄今对地震预测的核心问题，即地震预测的三要素——地点、时间和大小（强度）依然没有得到解决。诺贝尔奖得主李政道教授（1999）认为，在科学上"所有物质的动因，它的原理是由一些很基本、很简单的理论操纵的。我们能找出这些原理就可以知道一切东西的原理，如19世纪的电磁理论和20世纪的相对论和量子力学"。据此有理由认为，当今的地震预测基本上还是经验性的"感悟"。图078－1给出了当前地震预测的基本框架，这也是目前地震预测的科学水平（陈颙，1997）。图中E_1，E_2，……E_n分别代表震前观测到的各种异常现象，CF（E_i）表示第i种异常中包含的前兆信息量，CF（H，E_1），CF（H，E_2）……CF（H，E_i）表示在第i种异常出现后发生地震的概率。

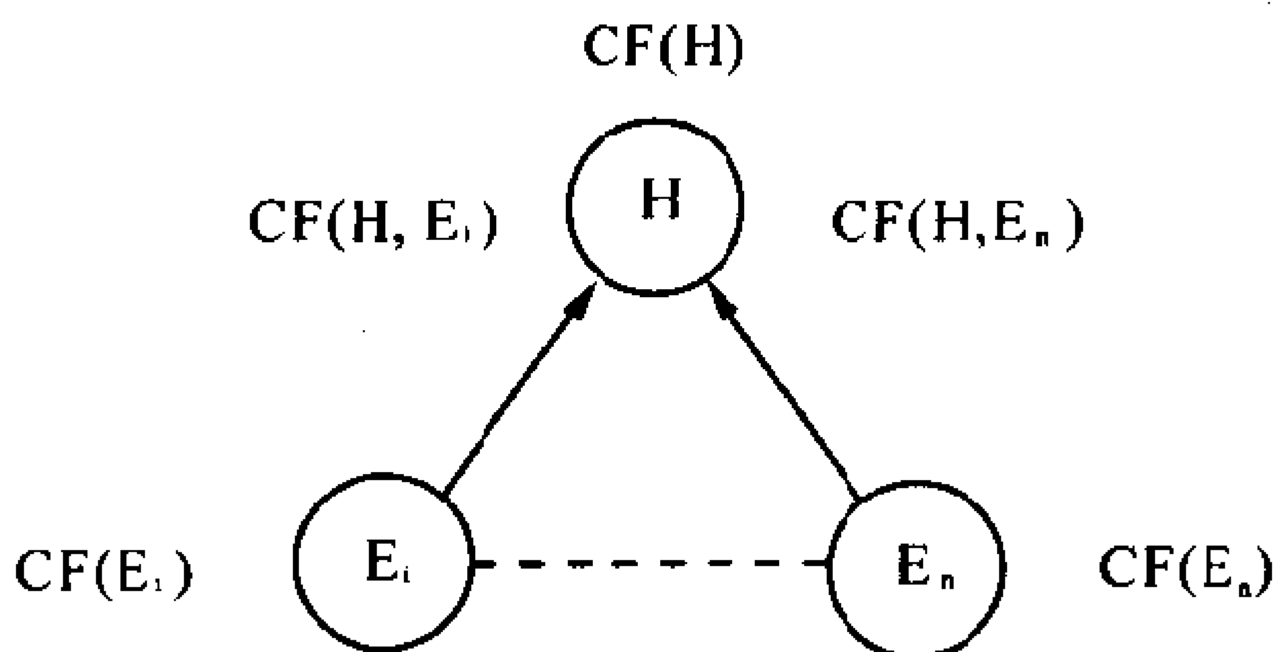


图078－1　地震预测框图

用不精确的方法可以将各种信息综合在一起，得到地震可能发生的概率CF（H）。框图中的CF（E_i）、CF（H，E_i）都是根据过去的经验，由专家判断给出的。由于专家及专家判断的经验有限，震例有限，确定—不确定和偶然—必然之间关系复杂，所以地震预测的三要素至今仍十分含糊。20世纪90年代初，国际地震学会和地球内部物理学协会地震预测分会组织了13名专家，对各国地震专家提出的28种他们认为是有意义的地震前兆进行了严格评审，结果只评出三项，即强余震之间的地震"平静"，中国

海城地震前兆和日本伊豆—大岛近海7.0级地震前水氡含量减少。对于地应变、地倾斜、地壳运动等5项未能做出决定，而对于尾波、品质因数（Q值）、横波分裂、潮汐应变振幅、震群、自然电位、地电阻率和地磁场、电磁辐射、应变对降水量的响应、高程变化、地面垂直运动、断层蠕动、地壳形变、海平面变化、干旱等20项则未通过认定。当然未通过认定也并非意味着这些前兆毫无用处，但至少可以说这些前兆尚不成熟，是否真是前兆目前尚不能肯定。

地震预测如果不是对地震发生的地点、时间和大小加以适当限定的预测，就几乎没有什么价值（陈运泰，1997），所以地震学把地震前兆定义为：地震之前发生的，被认为是与该主震的孕震过程有关联的一种环境参数的、定量的、可测量的变化。把地震预测定义为：同时给出位置、大小、时间和概率四种参数，且误差小于、等于下列数值的预测：

位置：±1/2破裂长度；

大小：±0.5级（或±1/2破裂长度）；

时间：±20%复发时间；

概率：预测正确次数/（预测正确次数+预测失误次数）。

对照这一要求，虽然目前的地震预测取得了不少值得称道的进展，比如我国对辽宁海城地震的成功预测，但总体来说，目前地震预测的科学水准仍是十分有限的，准确率只有10%，最多为20%，错报率、漏报率很高（陈颙，2002），这就是说，在地震灾害的预防，在最大限度地减轻地震灾害方面还不能单单依靠地震预报。在科学上还没有充分证明地震预测、地震预报具有精确性、正确性之前，任何国家和政府都不会在100万人口以上的城市进行紧急疏散和撤离，因为一旦出现误报、虚报，其所造成的损失并不比一次中型地震灾害小。目前地震灾害的预防主要包括工程措施（硬件）和非工程措施（软件）两类。搞好工程建设



的安全设防是减轻地震灾害最主要的方面。我国已于1990年正式颁布了新一代地震烈度区划，作为城市规划和一般工业与民用建筑抗震设防的依据。建立地震的早期警报系统，也是减轻地震灾害的工程措施之一。比如距墨西哥城约400km的可可斯板块边界，在20世纪发生过42次7级以上大地震，对墨西哥城构成了严重威胁。为此，墨西哥城于1989年用2年时间在该边界建立了一套地震早期警报系统。一旦可可斯地震发生，该台站就立即将地震警报用无线电自动向墨西哥城广播。由于无线电波是光速，而地震波则仅以每秒数千米的速度传播，当P波/S波到达墨西哥城引起地面振动时已晚了72s。72s是可以避免大量人员伤亡的。类似的地震早期警报系统已在日本和我国台湾等地投入使用。震灾预防的非工程措施是各种宣传、教育和普及地震知识等，是软件，但对稳定社会秩序及防灾减灾也是十分重要的思想素质准备。

地震是地球整体运动和演化过程中的一种自然现象。随着高质量地震观测数据的迅速积累和实时处理，随着地震观测技术的数字化，以及从太空对地球进行观测等高新技术的应用必将从目前的纯经验方法向动力学方法转化，地震预测的定量化将会一天天逼近，但目前还不能实现。

179 火山与火山灾害

火山是地球内部能量—物质突然释放的事件，地下深处的高温岩浆通过地下通道从地壳中喷发到地面即火山。火山爆发是全球最宏伟壮观的自然现象之一。一次大规模火山爆发所释放出的能量十分巨大，如1980年美国西部圣海伦斯火山爆发所释放的能量就相等于1945年美国投向日本广岛第一颗原子弹的500倍。

火山爆发的过程比较复杂，按火山通道形状可分为裂隙式喷发和中心式喷发两种。裂隙式喷发的火山喷出物都是从狭长的裂

隙或裂隙群中喷射（溢流）而出的，它和中心式喷发的不同是火山口不呈圆形而是线形裂隙，在地质历史早期，由于地壳较薄，因而火山喷发以裂隙为主。现代或近代裂隙式喷发主要局限在大洋中脊和大陆裂谷带上。大洋中脊由于其反复裂开和玄武质岩浆的喷发与充填，几乎覆盖了整个洋底。大陆上的裂隙式喷发，由于玄武岩从裂隙流出（溢流玄武岩），所以往往构成宽阔的玄武岩高原，如哥伦比亚高原，玄武岩覆盖面积达13万 km^2，熔岩厚度达100m；我国张家口以北的汉诺坝玄武岩也形成明显的高地，四川峨眉山玄武岩覆盖了云、贵、川三省邻接的广大地区。

中心式喷发是火山物质从中央火山口或火山喉管溢出，平面上呈点状，典型构造为火山锥，火山口位于锥顶。这种喷发是中新生代和现代火山活动的主要方式。中心式喷发常伴随有强烈的爆炸，大量气体和尘埃从火山口中心喷出，形成高耸入云的烟柱（图079－1），称普里宁式喷发柱，而熔融岩浆小滴和炽热的岩石碎屑也直射天空，然后再降落到火山口周围。

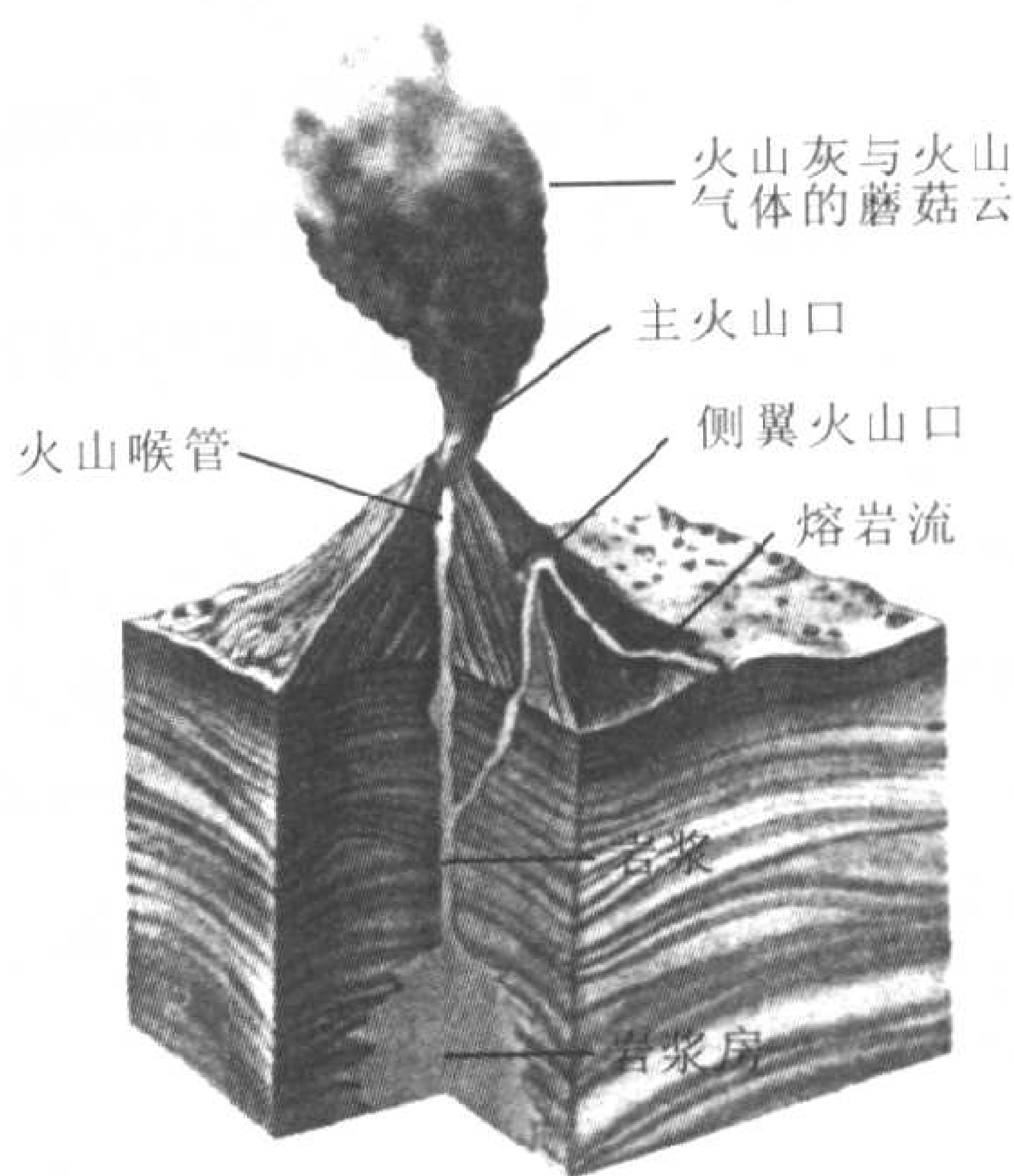


图079－1　火山喷发的蘑菇云“烟柱”
（引自《火山与地震》，2000）

中心式火山依据其爆炸强度，可再区分为猛烈式、宁静式和递变式三种。猛烈式又称培雷式，具突发性特点。1902年，西印度群岛培雷火山突然爆发，使山脚下美丽的海滨城市圣皮尔在几分钟内被灼热的火山灰流所毁灭。宁静式又称夏威夷式，熔浆以基性（玄武岩）为主。夏威夷群岛上的莫纳罗亚火山是世界上



最大的宁静式活火山，它的熔浆溢出十分宁静，以致人们可到现场观看。递变式，以猛烈式和宁静式有规律交替喷发为特点，多数火山属于这种类型。由于宁静期长短不一，正在喷发或在历史上[①]经常做周期性喷发的火山称活火山；历史上无喷发记载且火山构造已遭严重破坏的火山称死火山；年轻而形态完好，现在虽然不活动，但可能处于宁静期的火山称休眠火山。火山喷出物，前已述及，主要是火山气体（水蒸发占70%以上）、熔浆流和火山碎屑。火山气体并非全部逸散，其中有相当一部分直接由气体凝固成凝华物堆积在火山口附近，常见有硫磺、氯化铵、氯化钾、硫化砷等，有的可形成矿床。火山碎屑属固体喷出物，主要有火山弹（>60mm）、火山块、火山砾、火山灰（<2mm）4种。熔浆流属液体喷出物，冷凝后即为熔岩。

根据20世纪的调查，目前全球有500~600座活火山，与地震一样，大多数火山分布于板块边缘，其中80%分布在汇聚板块火山岛弧带，15%分布于板块分离带，5%分布于板块内部。主要有4个火山带：1. 环太平洋火山带，活火山占全球活火山的60%，每年大约有5座火山爆发，被称为世界的“火环”；2. 地中海—喜马拉雅火山带，活火山占20%，主要分布于西端，以意大利的火山最为著名；3. 大洋中脊火山带，约有60座活火山，以冰岛火山最为著名；4. 红海—东非大陆裂谷火山带，有活火山22座，乞力马札罗山便是一例。我国地处太平洋板块、印度板块和西伯利亚板块之间，晚近时期属于环太平洋火山带的黑龙江—吉林有过火山爆发，白头山火山锥锥底面积达300km^2，

① 历史时间的长短视不同国家、不同地区的具体情况而定。日本火山活动频繁，以2000a为准，我国火山活动频度低，间隔周期长，拟用10 000a为界。但学者们认为，以时间决定火山的“死”、“活”有局限性，应以有没有“岩浆系统”来认定。



锥顶有火山口湖即天池；东南沿海从福建泉州经澎湖—汕头到雷州半岛和琼北亦有火山喷发，自该带向东是台湾大屯火山群（大屯火山和鲤鱼山火山为活火山）、基隆火山群和基隆外海火山岛；属地中海—喜马拉雅火山带的新疆于田（卡尔达）和云南腾冲都有火山活动，卡尔达1951年还发生过火山喷发。从近年来对腾冲和天池火山的实地调查来看，它们都是休眠火山，火山口之下均有活动岩浆房存在。

火山爆发引起的火山灾害，虽不及地震灾害那么频繁惨重，但也相当严酷。据统计，在已过去的400年间，火山夺去了27万人的生命。火山直接致灾的方式有火山泥石流、火山碎屑流、火山熔岩流、火山灰云和有毒性气体（SO_2、CO_2、CO、F、Cl等）排放等。著名的意大利维苏威火山一次可怕的喷发吞没了庞贝、赫库兰尼姆和斯塔比亚三座海滨城市。除此之外，火山喷发还常常伴随或诱发地震、海啸、爆炸、火灾、崩塌等灾害。历史上著名的印尼喀拉喀托火山的猛烈爆发及其诱发的地震、海啸和山崩，使喀拉喀岛的2/3被崩裂落入海中，1/3被熔岩和火山灰所覆盖，岛上原有的一切生命活动全部被毁灭。火山爆发对生态环境和全球变化的影响是任何地质灾害所不及的。1991年6月菲律宾皮纳图博火山喷发，大约有2000万t以上的SO_2随普里宁柱进入平流层，在SO_2转化为H_2SO_4的过程中，因平流层臭氧的光解速度增快，从而使大气圈臭氧含量明显降低，而进入平流层的火山物质半年后即扩散到全球范围，并使全球大气环流和降压水场、风场发生显著变化。专家们估计，仅此火山爆发就足以抵消近百年来人类活动所造成的升温效应，其对全球变化的影响可见一斑。

火山爆发在给人类带来火山灾害的同时，也给人类带来许多好处，火山活动所带给人类的益处其实远远超过害处。火山的造陆作用及其留下的奇异景观是无与伦比的风景胜地和休闲场所，



如美国的黄石公园、日本的富士山、意大利的维苏威火山和我国黑龙江的五大连池等。火山灰可使土壤疏松，形成黑土地、矿泉水、温泉、地热以及富含 Fe、Cu、Au 等众多的矿产资源，不仅给人类引来了健康泉源，而且也带来了丰厚财富。

180 化学定时炸弹与环境地球化学灾害

地质灾害对人类的威胁或危害有两种形式：一是突发式，如地震、火山、滑坡、泥石流等，其灾难性猛烈而残酷；另一种是渐变式，即潜移默化的危害，其灾难性是慢性灭绝，对人类而言，之前还伴随有巨大的痛苦与折磨，这就是被称为化学定时炸弹所引爆的环境地球化学灾害。

化学定时炸弹（Chemical Time Bomb）[①]，简称 CTB，是由荷兰人 Ir.F.A.M.De Hann（1978）提出的，用以描述荷兰施肥过量的砂质土壤中磷酸盐过度聚集给未来造成的危害，之后奥地利的 W.M.Stagliani（1988）重新使用这个术语，并给以明确的定义，即 CTB 是“导致在土壤及沉积物中储存的化学物质，由于环境的缓慢改变而活动化，从而发生延缓而突发的有害效应”。化学物质的累积与延缓效应表现在投入土壤的化学物质，在早期它们之中的大部分将被土壤吸附、吸收与固化，只有少部分被释放到土壤溶液中，但当土壤中化学物质接近或达到饱和时，如果继续增加投入，即使是少量的投入也会导致大量有害物质的释放，这是其一。其二是由于改变土壤承受能力的环境发生了变化，如气候的变化，以及土地使用方式的改变，如林草地改变为耕作地等都将使土壤承受能力（土壤脆弱度）迅速降低，从而导致化学定时炸弹的引爆。引爆的规模有局部的和区域（流域）的不同，废矿渣（尾矿）和工业废弃物引起的化学定时炸弹引爆一般是局部

① 化学定时炸弹的有关材料，主要来自谢学锦教授的相关论述。



的，但比较快速，而废液、废气及化肥等引起的化学定时炸弹引爆则是区域性或流域性的，一般比较缓慢。人们发现化学定时炸弹的危害，首先是从小规模引爆开始的，如果不及时采取有效措施而任其发展则会由局部发展为区域或流域，甚至洲际及全球，如氟中毒，全球约1/2人口身受其害，在我国几乎祸及除上海市之外的所有地区。从局部到流域的实例则是美国纽约州Big Moose湖中pH值在不到10a之内，由5.6以上降至5.0以下，因而产生鱼类突然完全死亡的效应。Big Moose湖位于美国西部高度工业化区下风，虽然由于工业化释放了大量SO_2，但在70a的时间内湖水pH值变化并不大，然而到了20世纪50年代，湖水pH值急剧下降，小于5.0，使湖中鱼类突然灭绝。经查证之所以突然“引爆”是湖四周在燃煤时期一直承受SO_2投入的土壤达到极限后所产生的化学累积和延缓效应的结果。再如位于德国、波兰、捷克交界处的森林，在20世纪80年代突然大面积死亡，经勘查也是基于上述同样的理由。虽然森林区的土壤有很高的承受能力，但经过约200a的欧洲工业化过程，土壤对pH值的承受能力已达极限，致使200a后的20世纪80年代早期，突然下降到4.2以下，使大量Al元素活化而导致森林大面积衰亡。

欧美等发达国家虽然科技领先，但直到20世纪90年代才认识到，经过200a剧烈的工业化和农业“化肥化”已形成了大量污染点，面积之大、清除之难，即使应用现代技术与雄厚资财亦已无法使之再清洁，因而正在试图建立长期监测系统，以便对化学定时炸弹进行预测，并设法使已累积大量化学物质的土地维持现状，不再因环境及土地利用之改变而使之恶化或“引爆”。我国的工业化起步较晚，正处于现代化的发展阶段，欧美等发达国家上述环境问题的教训及“引爆”警示对中国建设是非常及时、非常有益的。

从近年来对我国地球化学环境的监测数据看，我国是继欧洲



和北美等国之后世界上第三大重酸雨国，但由于环境承受能力尚未到达极限，湖泊水体酸化和森林大面积衰亡等严重酸雨危害现象表现得尚不明显。不过自1996年起酸雨降水普遍加重，平均pH值低于5.6的城市已达43个，湖南长沙降水pH值低于3.54，酸雨频率大于60%的城市已有24个，酸雨CTB的威胁已从南方扩展至秦岭以北。工业及城市污水排放量目前已达1亿t/d左右，污水中含有很多化学物质，特别是有害物质，使被污灌的土壤受到严重威胁。据检测分析，在污灌区中已发现重金属及镉的累积，已出现含镉量很高的“镉米”。由于农业上不断过量施用化肥和农药，导致土壤中硝态氮和亚硝态氮含量急剧增加，砷、镉、汞、铅、铬等元素已在某些工矿区周围的土壤中形成累积，缓慢地改变着那里土壤的性质。如果土壤有机质含量减少加快的话，则土壤中的As、Cd、Hg等毒性元素将会很快流失于附近的河湖及地下水体中，甚至造成比发生于1953～1956年日本熊本县水俣市更加严重的水俣病事件①，水俣病是因环境改变所引发的CTB提前“引爆”的典型实例之一。因废矿石及冶炼炉渣随地堆弃而使环境改变所引发的地球化学灾害则是贵州兴义的铊(Tl)中毒症。铊中毒的原因是大量开采汞-金矿石而快速“引爆”的结果。

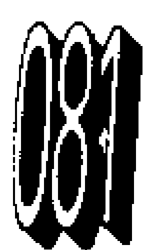
此外，还有一些因当地岩石中某些化学元素含量异常而引起的环境地球化学灾害，如滇西南的煤烟型砷中毒症，它是由于该地区所产煤炭中砷含量过高（平均为820mg/kg）所引起的；鄂西土家族苗族自治州的富硒中毒症也是由于该州二叠系炭质硅岩及石煤中含硒较高（平均为100mg/kg），而硒又被水溶解，并带至土壤中累积而引起硒中毒的。

---

① 水俣病事件即发生于日本熊本县水俣市含无机汞的工业废水污染水体，使水俣湾的鱼中毒，而人食用鱼后发生的中毒事件。

环境地球化学灾害，是长时间缓慢起作用的潜在地质灾害。化学定时炸弹的大规模引爆通常需要几十年甚至更长的时间，一般不会发生在正被剧烈污染的时代，也不会发生在活着的一代，更不会发生在当时当政决策者的在任时期，所以如果不提高警觉，不持续地采取有预见性的措施，则化学定时炸弹在某一较长时期后引爆将是不可避免的。我们应为子孙后代着想，要“前人栽树，后人乘凉”，不要“前人祸害，后人遭殃”。欧洲及北美先发展后治理的失败之路，无论如何也不能重蹈。如此，则中华民族幸甚，华夏子孙幸甚。

四、地球生命的诞生与进化



地球生命的诞生奥秘

就目前所知，地球是惟一有生命存在的星球，因此人类对生命① 的全部知识当然也全部来自地球。人类能够述说的生命历程其实也只是地球上存在过的及存在着的生命历程，这也是地球科学研究判断生物（古生物）生命诞生和起源的出发点和根据。

由于地球和地球的宇宙环境是大爆炸形成的，大爆炸产生的最基本的物质是相同的。基于这种认识似乎没有理由否定地球生命在宇宙中出现的普遍性和典型性意义。根据生命科学和相关学科已揭示的事实，所有生命都是从单细胞生物逐渐进化而来的。单细胞生物是有机分子的产物，有机分子是无机分子的产物，而无机分子则又是最基本的化学元素聚变或化合而成的，这之中占细胞总质量95%、占生物总体质量98%的元素是C、H、O、N、P、S六种元素。在人体中仅C、H、O、N已占95%以上（别的生物也是以这些元素为主），其余的为Ca、K、Na、Mg、Cl、Fe等40余种，可见：构成生命的都是地球上的元素，那么这些最基本的元素又是从哪里来的呢？这就是生物生命诞生最遥远的那一个环节，是生命的直接起点。

20世纪物理学的一个极大贡献就是知道了一切我们所知道的物质都是由12种基本粒子，即由6种夸克（粲夸克和奇异夸

① 地球上的各种动植物和微生物都是生命，病毒是生命与非生命之间的第三种生命形式，属边缘生命或不完全生命。



克、顶夸克和底夸克、上夸克和下夸克）和6种轻子（电子和电子中微子、μ介子和μ子中微子、τ子和τ子中微子）所组成的。按照宇宙大爆炸理论，夸克集聚在一起形成质子和中子，继而聚变成氢。氢是最简单形式的原子，也就是说，地球上多种多样的物质都是以最基本粒子聚变成氢开始的。然后是2个氢合成1个氦，氢(H)和氦(He)占了全宇宙物质的99%，氦再进一步合成其他元素，如氢核+氢核合成氦核，氦核+氦核合成铍核，铍核+氦核又合成碳核，如果碳核再和一个氦核聚变就出现了氧核。宇宙在不断地膨胀聚变，新元素也在不断地产生，如此则现今已知的元素是从轻元素到重元素大约在“大爆炸”后的(50~60)亿a而逐渐形成的，可见元素形成时间远比太阳系起源较早，这意味着其他星球也有相应的元素形成。以目前的科学观测，作为恒星的太阳现仍进行着氢和氦的热核聚变，是太阳热核聚变所释放出来的光和热在照亮和温暖着地球及地球万物，是太阳和宇宙热核聚变形成的各种元素，经过化学作用形成了我们生活中所见到的千姿百态的各类物质。当然生命也不例外，因为生命也是物质的一种存在形式。从化学组成上看，生命都是以细胞形式产出的元素及其化合物的集合体，无论是无机化合物，还是有机化合物，都是宇宙进化某一阶段非生命物质发生的一个进化过程。以人类为例，人的体溶中，各种无机离子的比例就和海水十分近似，这被视为生命起源于海洋的一个旁证，而有机物对于生命的作用则是决定性的，其中的核糖、核酸和蛋白质是构成生命的最基本物质。科学家们推测，在地球生命初始形成过程中是先有低等植物，后有高等植物（糖类为主体）的。核酸本质上是一种多聚核苷酸，而核甘酸是由碱基、戊糖和磷酸所组成。根据核酸中所含戊糖种类的不同又可分为脱氧核糖核酸和核糖核酸两种，也就是今天大名鼎鼎的DNA和RNA。据学者们研究，DNA和RNA都是又细又长的分子，即DNA分子和RNA分子，



DNA 中的糖为脱氧核糖，每个糖基上都连着一个平面小基团——碱基。碱基堆积在内部有严格的配对关系，也就是说，DNA 分子中只存在 AT、TA、GC、CG 四种组合形式，人们梦寐以求的基因或遗传密码就藏在其中。这个密码子就是基因，它控制了天然蛋白质中 20 种氨基酸的形成，而蛋白质是由氨基酸组成的长链，是一类含氮的高分子化合物。地球上有约 150 万种生物，估计蛋白质总数为 $10^{10}\sim10^{12}$种。地球上的所有生命现象都直接或间接地与蛋白质有关，就人体而论，人体中有几十万种蛋白质，一种细胞中就有几千种蛋白质。可知：核糖—核酸—蛋白质是最基本的生命物质，了解了这些生命物质基础，再去看地球生物生命的物质发生过程就比较容易了。

182 地球生命的太空移植说

早在 20 世纪之初，著名化学家 S.A. 阿伦尼乌斯（1907）就提出，微生物从空间飘到地球上，播下地球生命的种子。其后一直到 20 世纪 70 年代才又有学者（F. 克里克，1971）指出，地球生命可能起源于宇宙高级文明，有两个事实：一是现在地球上的形形色色的生命体，从病毒到人类，遗传密码具有奇怪的一致性，这表明生命进行中曾在某个阶段越过了一个小种群的环节；另一个事实是宇宙年龄是地球年龄的 2～3 倍，生命有足够长的时间演化，然后第二次从简单起点进行到高度复杂的文明。天文学家和地质学家提供的证据亦表明，在银河系中地球是一个较年轻的星球，地球地壳刚形成不久生命就出现了，似乎出现得过快，相反地球生命化学进化的时间又显得太短，因此新的观点认为，前生物的化学物质可能来源于宇宙空间，也就是说，地球生命的起源物质以及生物分子可能不是或不完全是源自地球，而是来自宇宙空间，育于地球的。

当然，对于生命现象是否存在于地外，科学家们一直在进行

着探索，目前探测最多的是月球，其次是地球的姐妹星火星。学者们普遍认为，太阳系最可能有生命存在的就是火星。从南极洲发现的火星陨石 ALH84001 上似乎找到了 36 亿 a 前火星表面存在最低等细菌化石的证据（欧阳自远，2003），表明火星可能曾经孕育过生命，但火星生命之谜仍有待进一步探寻和证实。2003 年 6 月，欧洲宇航局“火星快车”（猎兔犬 - 2）和美国“火星探险漫游者”（勇气号）先后发射升空以更进一步寻找火星上水存在过的踪迹，寻找火星生命存在的证据，并将火星样品送回地球。此外一些学者还认为，太阳系 9 大行星间可能“并不是彼此孤立的”，“很可能有东西在行星间飞来飞去”，这意味着生命在太阳系中可能只出现过一次，然后通过陨石传播到其他行星上，而陨石则是被彗星或小行星撞击后推到太空的。

尽管到 20 世纪末在除地球之外的其他行星上尚未发现活的有机体,但已多次发现陨石中含有氨基酸和脂肪酸,这些都是“通往生命途中的化合物”。学者们从中已发现了 18 种氨基酸,其中有 6 种存在于地球生物蛋白质中;在星际分子云里先后发现有近百种星际分子,其中绝大多数是有机分子,有的还是含有 13 个原子组成的长链,仅 20 世纪 60 年代就在星际空间发现了氢氧原子团(OH)、水分子(H_2O)、氨分子(NH_3)、甲醛(HCHO)等多种无机和有机分子;对彗星所做的光谱分析也表明,彗星含有大量水分子和尘粒,还有氨分子、甲烷、一氧化碳,并有少量的乙腈(CH_3CN)、氰化氢(HCN)等多种有机分子,这些都有力地揭示出孕育生命的种子潜伏在星际分子之中,而且还存在着生命诞生之前的化学进化过程和包括地球在内的生命物质交换。

生命起源是一个很奥妙的科学问题，大趋势是生命来自无生命物质。生命总是从无生命的物质经过化学进化阶段而来的，化学反应不可避免地会朝着产生生命的方向前进。在这个问题上，人类所倾注的热情和想像力正在把人类一步一步地提升起来，这

是非常奇妙的，而宇宙也因有了生命变得如此多娇，呈现出了独特的优雅和细腻。

183 化石：远古生命进化的历史证据

从地球形成至今已有 46 亿 a 的历史了，而有文字记载的人类历史仅仅只有 3800 多年，那么人类如何能知道地球上多达几百万种的形形色色的生物是怎样进化过来的呢？这就是化石证据，是一种记录生物进化的特殊文字。科学家们正是使用这一特殊文字所携带的生物进化信息来演绎古生物的进化过程的。古生物学不承认童话、神话和幻想，古生物学上的一切问题都要通过“化石”来解决。

按照古生物学的定义，化石是地质时期保存在岩层中的古生物遗体、遗物和活动遗迹。主要有 4 种：1. 实体化石，指古生物遗体本身的全部或部分。2. 模铸化石，指生物遗体在底质、围岩、填充物中留下的印模和复铸物，可再区分为印痕化石、印模化石、铸型化石和复型化石等。3. 遗迹化石，指古代生物活动时在底质沉积物表面或内部留下的痕迹和遗物。遗迹化石是化石中的珍品，有足迹化石、爬迹化石、粪化石或卵化石。足迹化石如陕西神木东崖硬砂岩中的禽龙足迹，四川广元、山西大同和山东莱阳等地的恐龙足迹化石等；爬迹化石是蠕形动物的爬迹或钻孔生物留下的孔道和管穴；粪化石，如周口店北京猿人洞穴中的鬣狗粪化石；卵化石如恐龙蛋化石，以及发现于我国黄土高原的 200 多万年前的鸵鸟蛋化石。粪化石、蛋化石都属于遗物化石，此外植物所分泌的汁液、树脂等也能形成遗物化石。旧石器时代远古人类的劳动工具，如中国猿人使用的石器、山顶洞人的装饰品、洞穴壁画和雕刻等也都属广义的遗迹（遗物）化石。4. 化学化石，又称分子化石，指古代生物的遗体虽已被破坏，但组成生物的有机成分如氨基酸、脂肪酸、叶绿素等仍保留在岩层



中，这类化石叫化学化石。

以上化石（化学化石除外）中，大多是肉眼即可辨认的化石即大化石，此外还有在普通显微镜和电子显微镜下才能观察到的微体化石和超微（体）化石（小于10μm）。微体化石主要指有孔虫、放射虫、孢子、花粉等。远古时代的细菌和蓝藻化石也是微体化石，超微化石主要指超微浮游生物以及古细胞化石等。显微和超微化石把生物进化的记录向前推进了35亿a，甚至40亿a左右的地质年代。

那么这些大化石及微体（超微体）化石又是怎样形成的呢？具备哪些条件才能使其得以很好地保存下来呢？根据古生物学家的研究，化石的形成首先取决于某一地质时期生物的数量，一般地说，生物死得越多，形成的化石就越多，例如海洋中的三叶虫、珊瑚、藻类及茂密森林区的植被，一旦环境剧变，这些生物因分布集中，所以较容易形成化石。在海洋地层中易找到动物化石，在煤系地层中易找到植物化石主要就是这个原因。其次是生物体本身有部分易于被保存的硬质部分，如贝壳、甲壳及脊椎动物的骨骼、牙齿，以及植物的茎干、种子、花粉、孢子等。第三，还要有一个被隔绝的环境，即要有淤泥、细沙等沉积物迅速将生物尸体沉积掩埋起来。此外泥陷、封闭、冷藏、洞穴也可形成完好的化石，如黄河剑齿象化石为陷入泥潭而形成，琥珀中的昆虫即为严密封闭所形成，猛犸象即埋藏冷冻所形成。我国北京猿人居住的洞穴中就发现有极为丰富的洞穴化石。第四，必须要经过长时间的石化作用。

由于化石形成条件比较苛刻，加之有生物物种大灭绝的干扰，所以保存在岩层中的化石并不太多，学者们估计还不到生物体总数的1%，这也是化石生物史记录不够完备而至今仍存在疑问和纷争的重要原因。尽管如此，人们还是能够通过化石来揭示出不同地质时代生物的发生和发展历史的，这正像今天我们所看



见的各种现代动植物以及人类都有或长或短的寿命一样，古代动植物也是有寿命的。除个体有寿命外，物种也有寿命，旧的物种先后灭绝了，新的物种又相继诞生了，生生灭灭，永续不断。据此，学者们把这种物种间的生—灭—生的化石记录，按地质历史贯穿起来即构成了迄今已知的不同地质历史时期地球生物的生命诞生与进化史了。从目前已发掘的各种化石看，地球历史上的各种古生物并非是由同一时期出现的，而是有早有晚，有生有灭，有渐进有爆发，有简单有复杂。古生物学家发现最早的化石是在南非和西澳发掘出的，是距今约 35 亿 a 地质沉积物中的单细胞生物，没有实质细胞核，类似于今天地球上的蓝藻。因为 35 亿 a 前地球还处于童年期，童年期的生命应该非常简单。真核生物（有真正细胞核的生物）大约出现在 15 亿 a 前；高级生命形式出现在（7～9）亿 a 前；大约在 6 亿 a 前以三叶虫为代表的节肢动物（占当时海洋动物的 60%）突然发展起来，构建了海洋无脊椎动物的兴旺时期；至 4 亿 a 前，由于大陆板块漂移碰撞，陆地越来越多，藻类植物首先在湿地上生长，紧接着两栖动物和爬行动物也上了陆地，节肢动物也演化成昆虫；至 3.5 亿 a 前蕨类森林及原始裸子植物（通过种子繁殖的植物）也出现了，它们组成了地球上最早的原始森林，为后来的动物征服陆地创造了必备的条件；至 2 亿 a 前古生物中令人惊骇的生物——恐龙出现，至 6500 万 a 前，即白垩纪末期发生突变，几乎所有恐龙都灭绝了，然而在植物界，伴随着恐龙的灭绝，被子植物逐渐占据了统治地位。被子植物是一种先开花后结果的种子植物，它的鲜花和果实在呼唤着生物进化史上的新主角——哺乳动物的登场。哺乳动物是从爬行动物的兽型类演变而来的，至 300 万 a 前现代人类的祖先——猿人出现，标志着人类时代的到来。

由上述化石证据所反映的生物进化史即生物进化论是由 C. 达尔文(1859)确立的，它来自于生物学与地质学的结合。生物化

石在自老而新的岩层中从单细胞到多细胞,从水生到陆生,由卵生到胎生,由变温到恒温,从无脊椎动物到有脊椎动物,由原始低等脊椎动物一直演化到高等人类,这种由低级向高级,从简单到复杂的不可逆演化过程,就是生命诞生与生物进化的直接证据。地球自有生命以来的历史大框架也主要是靠化石顺序建立起来的。

084 生命进化的其他生物学证据

生命进化的证据，除了最有力的古生物化石证据外，在比较解剖学、胚胎学及分子生物学，以及生物地理学、比较生理学、遗传学等生命科学的诸多领域也都揭示出了生命进化的其他有力证据。现仅就与古生物学关系密切的比较解剖学、胚胎学及分子生物学的证据简述如下。

比较解剖学证据：以脊椎动物的两栖、爬行、鸟和哺乳动物这四大类群的行动器官——四肢（人的手臂、蝙蝠的翼、鲸的鳍状肢及鸟的翅膀等）为例可以看出，它们在外形上虽然差别很大，但在内部结构上极为相似。这类功能不同，形状亦异，而基本结构相同的不同动物器官称同源器官，同源器官在不同动物中的存在，说明它们是由同一个祖先演化而来的。另外在动物身上往往保存着被称之为痕迹器官的某些没有用处的器官，例如海洋里的鲸，它的后肢虽已退化，但在体内仍有后肢骨的痕迹，说明鲸是从陆生脊椎动物进化而来的；再如我们人类，身体上也保存着许多痕迹器官，比如体表的细毛（已不具有兽类体表毛的保温效应了）、动耳肌（已不能像兽类那样自由地转动耳壳了）、盲肠上的蚓突都属于痕迹器官。痕迹器官之所以被保留是由于遗传作用使这些来自它们共同祖先的器官在进化过程中退化后没有完全消失的结果，因此痕迹器官是生物进化的有力证据。生物体内各种痕迹器官的存在，都可以追溯到具有这些器官的生物与其他生物的亲缘关系及进化线索。

胚胎学证据：虽然胚胎学的研究，特别是早期的研究，并不是为了寻找生物进化的证据，但是研究结果却为生物进化提供了重要的科学根据。例如脊椎动物不同类群的代表动物，如鱼、蝾螈、龟、鸡、猪、牛、兔及人类，在早期发育阶段不论是在整体形态还是各个部分的发育方式上都极为相似，都具有鳃裂和尾部，头部较大，身体弯曲。胚胎发育时间愈早，体形也越相似，以后逐渐分化才显示出差别来，这种从形态结构到生理机动，能简单而迅速地重演的种族进化过程，是从胚胎学方面证明生物进化的极好证据。再如人的胚胎从5~6个月开始全身出现浓密的细毛（发），这些毛的排列形式与其他哺乳动物极为相似，但在降生前不久大部消失了，这表明人类的远祖曾经是全身覆盖毛发的一种高等动物。这种相对高等的动物与相对低等的动物在胚胎发育上的相似性，无一例外地证明，高等动物的祖先曾经走过低等动物的进化历程。

分子生物学证据：有关研究表明在核酸（DNA或RNA）和蛋白质分子组成的单体（核酸的单体为核苷酸，蛋白质的单体为氨基酸）排列顺序中保留着大量生物进化的信息。在这方面研究得最多的是生物体内的一种蛋白质分子——细胞色素C，它由104个氨基酸组成，可以用生物化学的方法将各种生物体内组成细胞色素C的氨基酸逐一进行定性测序，然后进行系统比较。以人为例，人与黑猩猩细胞色素C的氨基酸序列相同，而与其他生物的差异数为：与罗猴的差异数为1，与兔为9，与鲸为10，与马为12，与龟为15，与果蝇为27，与小麦为35，与酵母菌为44。可以看出：人与黑猩猩的亲缘关系较接近，而与马较远，与无脊椎动物，以及与小麦、酵母菌更是相差甚远。两个物种间同种蛋白质中相差氨基酸数目越少，它们分化的时间距现在越近，亲缘关系也越近；反之就越远。

对分子生物学在分子水平上所开展的生物进化研究及分子水

平上的进化证据,弥补了在地球上长达38亿a生命史上因化石记录不全而对宏观生命进化研究的不足,已越来越受到人们的重视。目前"生物是进化的"这一真理已经走完了从科学假说到具有多学科证实的艰难求索历程,已成为被人们普遍接受的科学进化理论了。

085 生命演化过程及生物演化年表

生命的演化过程计有元素起源和演化——生命前化学进化——生物进化三大层次即三大阶段(图085-1),其中元素起源和演化为物理进化,而生命前化学进化则是生命发生的最早阶段,即从无机小分子进化到原始生命的阶段。原始生命即细胞的开始,从原核细胞到真核细胞,从单细胞到多细胞则是生物进化阶段的开始。

目前已在南非巴布顿和澳大利亚西部的燧石层中发现了主要是球状和棒状单细胞细菌化石,其燧石的同位素年龄,南非巴布顿为 38×10^8a,西澳为 35×10^8a,可知:当时的单细胞生物已在地球早期就出现了。另据2002年的最新报道,德国科学家在黑海海底所发现的厌氧甲烷菌已生存了大约 40×10^8a,被认为是地球上最原始"居民"的孑遗,是地球早期的生命形式。厌氧嗜甲烷菌生活在没有氧气、阳光也达不

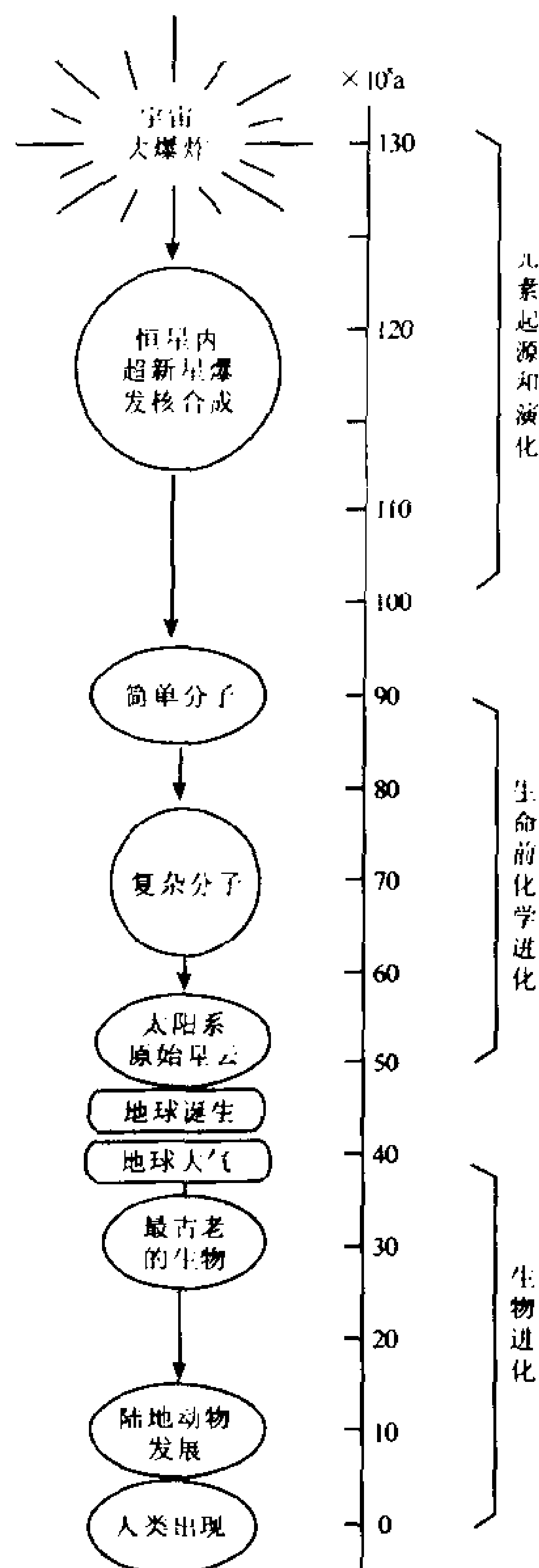


图 085-1 生命演化过程示意图
(据贾兰坡等,2000)



表 085－1　　　地球年龄与地球生物演化对照表

代	纪	世	代号	距今大约年代(Ma)	主要生物进化(以高等类型出现为标志)			
新生代	第四纪	全新世	Q	0.01	人类时代		现代植物时代	
		更新世		2.5				
	新近纪	上新世	N	5	哺乳动物时代	古猿出现	被子植物时代	草原面积扩大
		中新世		24				
	古近纪	渐新世	E	37				
		始新世		58		灵长类出现		被子植物繁盛
		古新世		65		★		★
中生代	白垩纪		K	137	爬行动物时代	鸟类出现 恐龙繁盛	裸子植物时代	被子植物出现 裸子植物繁盛
	侏罗纪		J	203		★		
	三叠纪		T	250		恐龙、哺乳类出现 ★		★
古生代	二叠纪		P	295	两栖动物时代	爬行类出现 两栖类繁盛	孢子植物时代	裸子植物出现
	石炭纪		C	355		★		大规模森林出现
	泥盆纪		D	410	鱼类时代	陆生无脊椎动物发展和两栖类出现		小型森林出现
	志留纪		S	438		★		陆生维管植物
	奥陶纪		O	510	海生无脊椎动物时代	(昆明鱼)		
	寒武纪		∈	570		带壳动物爆发 ★		
新元古	震旦纪		Z	650		软躯体动物爆发		
中元古			Pt	1000 1800	低等无脊椎动物出现		高级藻类出现 海生藻类出现	
古元古				2500				
新太古			Ar	2800	原核生物(细菌、蓝藻)出现 (原始生命蛋白质出现)			
中太古				3200				
古太古				3600				
始太古				4600	地球诞生			

★　全球生物集群绝灭事件;古近纪即老第三纪,新近纪即新第三纪。

到的地方,是利用化学代谢生存的。嗜甲烷菌的发现者伯丘斯说:“在地球茫茫历史中的相当长的一段时间内,地球原始‘居民’可能



就是类似黑海海底的嗜甲烷细菌之类的微生物。"20世纪60年代在太平洋加拉帕戈斯裂谷发现的"热液生物群",即由大型管状蠕虫、贝类和蟹类等组成的独特生物群,它们借以为生的也并不是进行"光合作用"的植物,而是用"深海热液"① 中的硫和金属元素通过"化合作用"制造有机酸的细菌。据此我国学者汪品先教授(2000)认为,这可能正是太古代地球上生物起源的途径。火山(热源)活动(海底黑烟囱及火山热泉)对地球生命的形成可能有特殊意义。

除上述已被证实的早期早前寒武纪生命形式外,其后的生命演化即大化石演化依据岩层化石所代表的古生物存活时代,特别是标准化石② 的存活时代,已基本得到了廓清,建立和描绘出了比较完善的生物进化时间坐标(表085-1)。可以看出:生物演化历史就是这样由低级到高级,由简单到复杂,直至产生出像人这样的万物之灵的进化过程。

086 显生宙生物进化事件

显生宙生物进化事件指古生代至现代12个纪(表085-1)的生物进化事件,从生物演化的角度看,则指多细胞动植物出现以后的生物进化事件,其具体开始时间,目前尚不能确切肯定,但根据已知的古生物化石和同位素数据,大致在(5.4~5.5)亿a或5.7亿a前。

生物进化的基本单位是种(物种),种也是生物分类中的最低一级单位。自种依次向上为属、科、目、纲、门、界。界是地球生物

---

① 即耸立于海底"黑烟囱"附近的一种高温(300℃~400℃)、轻质(0.7g/cm²)、富硫的深海热液。

② 标准化石是指生活在特定的地质历史时期,能用来确定其所在地层地质时代的化石。



分类的最高层次。有五界:原核生物界、原生生物界、真菌界、植物界和动物界。植物界和动物界是生物进化最庞大的两类[①],是显生宙生物进化的主体。进化的主要表现是它们组织器官的结构和功能等一系列的进化和创新,以及通过种形成和种灭绝所表现出来的生物圈组成的变化。显生宙地球生命中最主要的生物进化事件概括如下(张昀,2001)。

□ 无脊椎动物两侧对称躯体结构发展和无脊椎动物高级分类群的进化与产生(寒武纪早期)。

□ 动物的骨骼化,防护和支撑系统的进化。植物与动物几乎同时钙化(早期),后生动物适应幅射[②]。

□ 无脊椎动物中枢神经系统的发展和内骨骼的形成。从无脊椎动物中产生出脊索动物。低等脊椎动物鱼类起源和发展(寒武纪—奥陶纪)。

□ 陆地植物的木质化,维管系统和维管植物起源(志留纪—泥盆纪)。维管植物指具有木植化维管系统的陆地光合自养植物。

□ 鱼类运动器官和呼吸器官的改造,两栖类起源(泥盆纪)。两栖类是最先登陆的脊椎动物。

□ 生殖系统的进化改变(羊膜卵出现)[③],皮肤角质化的发展。从两栖类进化出陆生爬行类(石炭纪晚期)。

---

① 动物界主要有无脊椎动物和脊椎动物。无脊椎动物包括原生、海绵、古杯、腔肠、蠕虫、苔藓、腕足、软体、节肢、棘皮等动物门类;脊椎动物有鱼类、两栖类、爬行类、鸟类和哺乳类。植物界主要有蕨类植物和种子植物,种子植物又可分为裸子植物和被子植物。植物界已知现存物种在 27 万种以上。

② 适应幅射即趋异,指同一类生物产生很多生理和形态的分化,以适应不同生活环境的分歧现象。

③ 爬行类羊膜卵与两栖类或鱼类的卵有本质区别。羊膜卵是在体内受精的,因此能在陆地上孵化出幼小的动物个体来。



□ 水生无脊椎动物向陆地发展(陆生),节肢动物呼吸系统(气管系统)及外骨骼的结构特化,导致昆虫及其他陆生节肢动物起源(石炭纪)。

□ 爬行类(陆地脊椎动物)体温调节系统发展,温血动物起源(三叠纪—侏罗纪)。体温由变温进化到恒温是脊椎动物进化史上的第四次大变革(其他三次为颌、陆生及羊膜卵)。

□ 哺乳动物起源(三叠纪末),恒温、胎生和哺乳。

□ 爬行动物中的皮肤附属物演变为羽毛,飞翔器官(翅)的产生,以及躯体结构的适应进化导致鸟类起源(侏罗纪),裸子植物发展。

□ 被子植物(显花植物)起源(三叠晚期—白垩纪)及发展,成为植物界的主宰。

□ 灵长类脑与前肢的进化,思维器官和劳动器官产生(第四纪)。

□ 人类起源(上新世—全新世),文化系统建立(文化进化)。达尔文预言得到证实。

生命进化事件是漫长生命史的里程碑,是生命进化的脚步,每一个进化事件或进化的每一步都是对后来进化方向的各种可能选择的限制,都不同程度地影响着生命的进化历程。

87 寒武纪生命大爆发

寒武纪生命大爆发是地球上38亿a生命演化史上规模最为宏大,影响最为深远的生物创新事件,它在不到地球生命发展史1%的瞬间,创生出了90%以上的动物门类。然而学术界对此意见并不一致,到底有没有发生过寒武纪大爆发,寒武纪大爆发究竟是一次真实的生物大爆发,还是由于寒武纪之初生物开始形成矿化骨壳而造成大量化石突然涌现的假象,长时间难以确定。

地球上软躯体动物的首次爆发是在距今(6~7)亿a前的震旦



纪(新元古代晚期),由于最早(1947)发现于澳大利亚南部的伊迪卡拉山,故称伊迪卡拉动物群。伊迪卡拉动物群是目前已知寒武纪以前地球上古老而原始的动物化石群之一。在伊迪卡拉动物群发现之前的1909年,由美国科学家维尔卡特发现于加拿大西部落基山脉布尔吉斯页岩中的布尔吉斯动物群则为距今5.15/5.20亿a(中寒武世)较高水平的动物群,二者之间相隔约1.1亿a,而原始的伊迪卡拉动物群是怎样发展到较高水平的布尔吉斯动物群的,一直没有实际材料予以说明。发现于我国云南的澄江动物群不仅正好填补了这个生物史上一段非常重要的历史记录和演化空白,使伊迪卡拉动物群—澄江动物群—布尔吉斯三个动物群之间的演化关系得以澄清,而且揭示了寒武纪生命大爆发的全貌,甚至是很小的细节,为生物多样性的起源和生命演化提供了完整的材料,被国际学术界誉为"20世纪最惊人的科学发现之一",并认为中国澄江是"地球上最早的古生物圣地"。

澄江动物发现于1984年7月,由青年学者侯先光博士首先发现于云南澄江帽天山,随后国内外古生物学家对澄江动物群进行了辛勤的发掘和大量研究。截至2000年共发现100多种动物(低等藻类除外),分属于多孔、腔肠、蠕虫、腕足、节肢、海绵、环节和软体等动物门类,大多数都是以前没有见过的。现在地球上总共有30多个门类,而澄江化石群中就已发现了20多个门一级生物,表明"寒武纪生命大爆发"是一次可由澄江动物群佐证的、真实的生物大爆发事件。

澄江动物化石群中主要珍稀化石为奇虾、云南虫、怪诞虫及微网虫等。奇虾:是一种已经灭绝了的巨型食肉类动物,最长可达2m以上,是当时海洋中的"庞然大物"。云南虫:被认为是古老脊索动物的祖先,比发现于加拿大的凯亚虫早1500万a。云南虫有"吻—颌—躯干"三分体型,它应当属于地球上已知最早的半脊索动物(舒德干,1996)。半脊索动物是无索动物向有索动物演化的

关键类型，在生物进化中有十分重要的地位。显然云南虫神秘的面纱还有待进一步地发现和揭开。怪诞虫：因构造奇特而得名。怪诞虫最早发现于布尔吉斯化石群，最初英国科学家将其背刺解释成刺状腿，而将柔软腿解释为背须。在澄江发现完整的怪诞虫化石后才纠正了以上背腹倒置的错误。微网虫：与怪诞虫一样，微网虫也是早寒武世海洋中一群相当奇特的生物，因网状骨片构造而得名。澄江动物群发掘后才发现，这些网状骨片竟然长在这种虫形动物的身体两侧，这一重大发现使微网虫成了当年(1991)的化石明星。

在继帽天山埋藏地之后，在昆明海口又发现了澄江古生物群的一个特异埋藏地，该特异地所发现的"昆明鱼"和"海口鱼"(舒德干等，1999)是迄今世界上已知最古老的脊椎动物化石(5.3 亿 a 前)，它们的发现将脊椎动物的起源向前推进了 500 万 a。过去已发现的最古老脊椎动物化石产于 4 亿多 a 前的奥陶纪。

澄江动物群及"海口鱼"等化石的发现，使学术界形成了共识，前寒武纪末至寒武纪初，地球上的确发生了不可思议的生物门类的巨大创新事件——寒武纪生命大爆发。寒武纪生命大爆发是真实的，它的真实性和突变性正一步步地撼动着达尔文《物种起源》所建构的生命演化非常缓慢的科学框架。

恐龙与恐龙灭绝之谜

恐龙是中生代爬行动物的代表，也是在脊椎动物史上第一个成功占据地球海陆空三大领域的统治者，所以人们把中生代又称为"恐龙时代"。恐龙时代的恐龙构成了地球黄金时代一幅离奇古怪的生活图景。

恐龙的学术含义是指爬行动物分类系统中蜥臀目和鸟臀目这两个目级分类群的动物，是这两类爬行动物(化石)笼统的称呼。

蜥臀目恐龙包括两类：一类是两足行走的肉食性恐龙，另一类



是四足行走的素食性恐龙。在肉食性恐龙中又分为虚骨龙和肉食龙两类，虚骨龙所包括的都是一些个体较小，骨头中空，活动灵巧，过着快速、活跃的捕食生活的恐龙。肉食龙躯体笨重、小手短臂，推测它们可能不是活跃的捕食者。素食性恐龙，体躯一般都很巨大，全以食植物为主，形态结构都很特别。禽龙是最早发现的素食性恐龙，由英国乡村医生G. 曼特尔夫妇(1822)首先发现，为了纪念这一重大发现，后人在曼特尔故居前镌刻了一块铜牌，上面写着："他发现了禽龙。"

恐龙化石分布广泛，在全球7大洲均有发现。据美国宾夕法尼亚大学多德森统计，现已发现的恐龙有285属，336种，其中美国有64属，蒙古有40属，中国有36属，加拿大有31属，英国有26属，阿根廷有23属。但恐龙蛋化石则主要发现于我国，恐龙蛋是非常珍贵的古生物化石。到目前为止，我国已在15个省(区)约100多个地点发现了恐龙蛋化石。在河南西峡和湖北郧县白垩纪晚期地层中发现的恐龙蛋化石以其出土数量大，埋藏集中，蛋化石种类之多和原始状态保存之好而举世罕见，深受海内外各界人士的重视。

恐龙的产生据古生物学家研究，是由距今2亿a前三叠纪晚期较进步的槽齿目爬行动物演化产生的，经历了1.5~1.6亿a的演变，于距今6500万a前的白垩纪末期灭绝，神秘地消失了。恐龙为什么会突然消失，屠龙元凶究竟是谁？为什么恐龙过不了第三纪/白垩纪界线这个"鬼门关"？几十年来学术界一直争论不休，提出了种种假说，但概括起来主要是两类：灾变说(外因论)和渐变说(内因论)。

灾变说：当今最流行的灾变说是"外星说"，认为恐龙的灭绝与地外天体撞击地球有关。1978年诺贝尔奖得主阿尔瓦雷斯和他的儿子，在分析第三纪/白垩纪界面粘土时惊讶地发现，意大利古比奥地区样品的铱(Ir)含量是正常值的30倍，丹麦等地的样品超

过正常值200倍。据计算在第三纪/白垩纪界线上铱异常总量在500×10^4kg以上,而地壳中Ir的含量极微,但陨石中铱含量远远超过地壳。据此阿尔瓦雷斯等(1980)认为,在白垩纪末期,一颗威力巨大的小行星或彗星撞击了地球,引起了这场生物大灭绝,"恐龙王国"从此在地球上消失。这一假说被学术界戏称为"暗无天日说"。

著名学者许靖华教授根据彗星中含有较多的铱和剧毒物质氰化物认为,白垩纪末期撞击地球的可能是一颗彗星。彗星撞击地球带来的氰化物及其所诱发的气候生态和环境突变以及紫外线辐射,先把地球上的低等生物杀死,随之恐龙也惨遭灭绝。

主张灾变说的人为数不多,但是舆论很大,加之天地大碰撞总是带有神秘色彩,因此灾变论曾一度风靡全球。然而仍有不少学者对此持怀疑态度,既然食物链中断了,那为什么那些小型爬行动物却能免遭灭绝而侥幸存活呢?

渐变说:渐变说认为"恐龙王国"的崩溃和消失不是一朝一夕造成的,前后大约经历了3000万a的漫长时期,这是其一;其二是各种恐龙灭绝的时间不一致,例如剑龙在白垩纪初期就灭绝了,鱼龙和翼龙则是剑龙灭绝之后很久才消失的,而角龙是最迟进入死亡之门的"末代皇帝"。小行星或彗星撞击(假如确有撞击的话)对于恐龙的灭绝来说,也只是起到了最后一击的作用。

渐变说本身也还有不同的假说,主要有以下几种:1. 恐龙特化—老化说。恐龙在进化过程中日趋特化,而特化就是灭绝的先兆。2. 生物竞争说。从生物进化链看,哺乳动物比爬行动物高等,"四肢发达,头脑简单"的恐龙无法和哺乳动物争夺天下,于是终告灭亡。3. 性比例失调说。由法国生物学家克·皮奥提出,他推测恐龙卵在孵化时可能也是由于温度高低不同,全部孵化出了雄性或雌性后代,使得恐龙的子孙们在性的困扰中遗憾别世的。此外还有一种说法是恐龙向鸟类进化说,恐龙没有"死",它进化成



了现代鸟类。

由以上所述可知，恐龙灭绝的原因是比较复杂的，迄今还没有哪一个学说能合理圆满地解释恐龙灭绝的根本原因，但学者们普遍认为，只要从生物和环境两个方面进行深入研究，距离解开恐龙灭绝之谜的时日也就为期不远了。



189 人类进化的过程和阶段

人类的出现是地球地质演化的一件大事。那么什么是人类呢？达尔文(1871)提出，人类的特征是两足直立行走，大的脑子和高的智力。然而迄今世界各地的化石发现表明，两足直立行走和大的脑子不是同时出现的，于是人类学界一致认为，只能以能否两足直立行走作为人和猿的分界标志，能两足直立行走的高等灵长类便归入人的系统，分类上列为人科。根据这一界定，科学界估计大约在距今700~800万a前，古猿转变成两足直立行走的人类始祖，至少在500万a前[①] 人与猿就分道扬镳了(贾兰坡等，2000)，但是当前世界各地发现的人类化石，最早的只有400万a，普遍认定的人类发展史为距今300万a左右。更早的人类化石还有待发现。从400万a以来的人类化石来看，虽然其间还存在着“空缺环”，但总的来说，人类的进化过程还是可以区分为愈来愈清楚的4个阶段，即前人阶段、能人阶段、直立人阶段和智人阶段(吴汝康，1997)。但也另有学者划分为前人阶段、早期猿人阶段、晚期猿人阶段、早期智人阶段和晚期智人阶段的。

前人阶段：也称南猿阶段，以非洲南猿(南方古猿)化石为代表。南猿最早发现于南非北开普省汤恩采石场，化石是一个6岁左右的小孩(汤恩幼儿)的头骨，由南非维特沃斯兰德大学的利芒

---

① 现代分子生物学研究表明：猿与猴的分离时间是2200万a前，猿与人的分离时间是450万a前，此与目前已发现的化石记录是吻合的。

德·达特进行了研究。达特认为“汤恩幼儿”属于人类，并于1925年发表文章指出，这是与人系统最为接近的一类绝灭族，命名为南方古猿。之后他又和古动物学家罗伯特·布鲁姆在南非发现了大量南猿化石材料，表明南猿是人类进化系统上最初阶段的化石。南猿的各个种最早为440万a前，可持续到100万a前，是从猿到人过渡的晚期类型，分类上归入人科，可分为纤细型和粗壮型两种类型，纤细型进化为能人，粗壮型(粗壮南猿和鲍氏南猿)大约在距今100万a前灭绝了。

能人阶段：也称早期猿人阶段，其化石代表是能人。能人化石的发现十分有趣。1911年，德国昆虫学家威廉·卡德温克尔在坦桑尼亚奥杜威峡谷捕捉昆虫标本时，在差一点跌入峡谷的刹那间发现了周围有许多动物化石，自此拉开了东非能人化石大发现的序幕。然而由于第一次世界大战，发现工作被迫中止了。之后由当时在肯尼亚内罗毕博物馆工作的路易斯·利基夫妇对奥杜威峡谷进行了长期考察和发掘，直到1959年7月17日，在他们顽强工作的第28个年头才终于得到了报偿，在奥杜威峡谷距今175万a前的地层中发现了一件超级粗壮的猿类颅骨，利基将这一头骨命名为鲍氏东非人(后来改称南猿鲍氏种)，鲍氏这个名称来自支持利基一家在东非发掘的查尔斯·鲍伊斯。1960年，利基的儿子乔纳什·利基又在“东非人”附近发现了头骨盖、下颌骨和一些头后骨骼，利基根据达特的建议，将其命名为能人，其后不久又在其他地点发现了能人化石。能人是最早的人属成员，生存时间大致在100万a前到250万a前的更新世早期，与南方古猿生存时代重叠。能人的脑量平均为700ml，能直立，群居，能制造工具。能人可能由阿法南猿进化产生。

直立人阶段：也称晚期猿人阶段，或猿人阶段，俗称猿人。直立人在分类学上归于人属，即人属直立种，称爪哇直立人，简称直立人，是人属中较早期的一个种，化石代表为爪哇猿人。大量的爪



哇人化石发现于印度尼西亚，在我国也有广泛分布，比如北京猿人、蓝田猿人、元谋猿人等。综合已发现的爪哇人化石其特点是：长而低的头骨，脑容量约 850ml，牙齿粗壮，肢骨与现代人无大差别。产出爪哇人的最低层位是莫佐克托猿人化石层，属早更新世，年代不能精确确定，大致为(200/150 ~ 30/40)万 a 前。生活环境从当时存在的动物化石群反映出以森林为主、间有草原环境，当然这也是人类生息繁殖的环境。目前直立人化石在亚非欧(洲)均有发现。一般认为直立人是起源于非洲，然后迁徒到亚洲和欧洲的，但还不能完全肯定。直立人中时代较晚者是北京猿人。

智人阶段：智人是人科中惟一现实生存着的人种。分为早期智人(远古智人或古人)和晚期智人(新人—现代人)。晚期智人从距今 10 万 a 前开始，也有学者认为从距今(4 ~ 5)万 a 前开始，其解剖结构已和现代人相似，因此又称解剖上的现代人。

世界上早期智人化石有德国的尼安德特人，法国的圣沙拜尔人，英国的斯旺斯科姆人，赞比亚的布罗肯山人，中国的大荔人、丁村人、新洞人等，以德国尼安德特人(简称尼人)为代表化石，所以这一阶段又称尼人阶段。其与直立人阶段的主要差别是：除脑量有所增加外，还表现在石器制造技术的发展上，石器用途已有明确分工，能人工取火，有多种多样的地区性文化，并开始有埋藏死者的习俗。早期智人生活于距今(10 ~ 3.5)万 a 前，目前已发现化石产地 70 多处，欧亚非三大洲均有分布。

世界上的晚期智人有法国克罗马农人，捷克的姆拉德克人，意大利的格里马迪人，南非的边界洞人，印尼的瓦贾克人，澳大利亚的科阿沼泽人，中国的柳江人、山顶洞人、资阳人、河套人、丽江人、昆明人等，以法国克罗马农人为代表化石。晚期智人的进化主要表现在技术和文化层次上，大约在 3.5 万 a 前突然出现具有很高艺术表现力的雕刻和绘画，最引人注目的是裸女雕像的出现，暗示着母系社会可能渐趋正常，家庭生活已开始萌芽，工具的制造出现



了间接制作法，各种复合工具和鱼叉、弓箭等得到广泛使用，还能利用兽皮缝制衣服。大约在10 000a前，随着农业耕作的出现，衣食问题的解决，与生活有关的艺术创作，如壁画、雕像、装饰品以及几何图形和文字符号开始出现，人类精神文明亦已初露端倪。

克罗马农人的时代，据对其文物的同位素年龄测定，距今为35 000～10 000a前，属旧石器时代晚期，因此随着克罗马农人时代的结束，旧石器时代也就结束了，接着是新石器时代的开始。新石器时代不属于古人类学研究的范围，是人类学研究的范畴，多属于历史考古的内容了。

90 人类起源于何处：亚洲起源说与非洲起源说

人类起源的含义是指古猿是怎样演变成现代人[①] 的，是从猿到人或人文由来的问题，是早期人类怎样演变成较晚人类的问题，是物种的概念。此与现代人的起源不同，现代人的起源是指生活在世界不同地区的黄种人、白种人、黑种人和棕种人是怎样起源的，是从人到人的问题，是人种的概念。这里人类起源于何处显然是指前者，不包括现代人起源于何处的问题。

最初有人认为人类起源于欧洲，因为欧洲研究古人类的历史较早，最早发现的古人类化石也在欧洲。随着人类学的发展以及古人类化石的不断发现，欧洲起源说没人赞同了，连欧洲的学者也承认人类起源地不在欧洲。后来非洲发现了古人类化石，有人把目标转向了非洲，说人类起源于非洲；当亚洲发现了更多的古人类化石后，又有人认为亚洲是人类的发祥地。这个问题直到现在还没有解决，主要是亚洲起源说与非洲起源说的论争。

达尔文在1871年提出，人类的诞生地是非洲，理由是与人类

① 现在全球各地的人都属于同一物种，即高等哺乳动物中灵长类的一种，定名为现代人。



最相近的动物大猩猩和黑猩猩这两种大猿如今都生活在非洲，因而我们最早的祖先可能在非洲。达尔文的这个论点没有被普遍接受。

1868年，德国胚胎学者赫克尔提出人类起源于亚洲，因为亚洲的长臂猿和黑猩猩与人相似的程度大于非洲的猿类，他推测东南亚是人类的诞生地。赫克尔的学生荷兰人欧根·杜布瓦坚信赫克尔的看法，他作为军医于1890年随着荷兰殖民军到了印度尼西亚，决心要寻找人类的“缺环”。起初他到苏门答腊没有找到，随后他带着50名犯人沿着爪哇岛梭罗河两岸寻找，终于在凯登布鲁斯发现了一件下颌骨、一件扁平头盖和一根类似于现代人的股骨及牙齿。经过一番研究，他于1894年发表科学报告，称这种动物为猿人直立种或直立爪哇猿人。他认为爪哇猿人是介于猿和人之间的现代人类的祖先。但当时的学术界并没有接受他的发现，很长时间不被承认。

受赫克尔和杜布瓦的影响，美国自然博物馆馆长奥斯朋认为，亚洲位于其他大陆的中央，是哺乳动物起源的地方，他推测人类的老家或许在蒙古高原，并认为人类最初的祖先不可能是森林中人，也不会从河滨潮湿、多草木、多果实的地方崛起，只有高原地带环境最艰苦，人类在那里生活最艰难，因而受到的刺激最强烈，这反而更有益于演化，因为在这种环境中崛起的生物对外界的适应性最强。由于奥斯朋的影响和支持，美国自然博物馆中亚考察队于20世纪初期对民国西南及东南亚为寻找亚洲起源说的化石证据，组织了一系列考察，但最终均未找到人类化石。

从1927年起在我国北京周口店进行了系统的人类化石发掘，首先发现了牙齿，定名为中国猿人（后改称北京猿人），1929年裴文中又发现了北京猿人头骨盖，由此被视为人类起源于亚洲的证据之一。但是从1924年起非洲的发现动摇了亚洲起源说，先是在南非汤恩发现了南猿化石，以后在南非的其他几个地点也发现了

同类化石，特别是从1967年开始，在东非的许多地点发现了多种南猿化石，到20世纪90年代，共发现7种（非洲种、鲍氏种、粗壮种、阿法种、埃塞俄比亚种、湖畔种和始祖种）代表440～150万a前古猿化石的个体1000多个。这一系列发现被古人类学家一致承认是人类发展的第一个阶段，因为它们的形态远比亚洲的猿人为原始，年代也远较亚洲猿人为早，从而又提出了人类起源于非洲的论点。

由于非洲的早期人类化石主要发现于东非，因此对东非古环境在怎样促使人类诞生方面也有了许多论述。在地质历史上属于冈瓦纳古陆的整个非洲大陆原先覆盖着一片森林，有着相似的自然环境和动物群，在距今大约1200万a前，由于沿着坦桑尼亚—肯尼亚—埃塞俄比亚—红海一线裂开（东非大裂谷），从而使肯尼亚和埃塞俄比亚东部快速上升为海拔270m以上的高地，自此改变了非洲的地貌和气候。隆起的高地由于少雨，被森林连绵覆盖的环境开始分解成片林、疏林和灌木地镶嵌的环境，由于沿裂谷产生了一系列断陷湖泊，不仅使大裂谷东西两边的动物群交往受到阻碍，而且也使人（科）和猿从此产生了分化。这正如法国古人类学家柯盘斯（Y.Coppens，1994）所指出的那样，在距今300万a以上的人科化石地点都是在埃塞俄比亚、肯尼亚和坦桑尼亚发现的，而在这一时期，这个地区却没有发现大猩猩和黑猩猩的化石。他的解释是在东非大裂谷形成后，裂谷西边由大西洋吹来的气流照常带来雨量，而裂谷东边由于中国青藏高原西缘的阻碍，形成季节性的季风，从而使早前的非洲广大地区，分成两种不同的气候和植被类型，裂谷西边仍旧是湿润环境，保持着森林和林地，而裂谷东边变得干旱，成为空旷的稀疏草原。由于自然环境改变所产生的压力，人猿的共同祖先也发生了分裂。西边较大群居共同祖先的后裔适应于潮湿的森林环境，发展成两种大猿；而东边较小群居共同祖先的后裔则相反，出现了一种对空旷环境相适应的人种成员。



这种假说被称为“东边的故事”(East side story),但有不同意见,美国古人类学家布鲁内特在位于非洲大陆中心的乍得(在大裂谷之西约5400km)发现了距今300~350万a前的南猿的下颌骨,因此布鲁内特著文说,不只是有“East side story”,也有“West side story”(西边的故事)。

从以上所述可知,最有可能的人类诞生地不是亚洲就是非洲。因为自第三纪中新世以来,在亚洲和非洲大陆都发现过属于人科的化石,从演化角度看,这些化石直到第四纪,前后关系也都是连续的,所以这两处可能是人类最早出现的地点。虽然目前在非洲已发现有400万a的人科化石,但更早(400~800万a)的化石还没有可靠的资料,因而现在还不能肯定非洲就是人类最早出现的地方,也不能排除人类起源于亚洲的可能性。特别是在亚洲南部和我国西南地区,不仅拥有广大的新生代地层,有温暖和寒冷气候变化的交替记录,而且在这些地层中已发现有大量高等哺乳动物化石的灵长类化石,特别是多种古猿化石,如第三纪森林古猿、禄丰古猿等,尤其是禄丰古猿出土于褐煤层,处于中新世晚期到上新世早期,距今已有800万a的历史,而禄丰古猿也被称为“尚不懂制造石器的人类的猿型祖先”。所以我国著名古人类学家贾兰坡教授在其《中国大陆上的远古居民》(1978)一书中认为,“由于上述的理由我赞成‘亚洲说’,如果投票选举的话,我一定投‘亚洲’的票,并在票面上还要注明‘亚洲南部’的字样”。那就让我们新一代年轻的古人类学家,遵照先辈们的指点,像人类第一世家利基家族那样,在我国广大地区去努力发现和发掘吧,中国毕竟是可以和非洲竞争的人类起源研究圣地啊!

191 北京猿人的发现

北京猿人化石是轰动世界的古人类化石。它的发现开始于1914年瑞典地质调查所所长安特生(J.G.Auderson)受聘为中国政

府农商部矿政顾问之后的1918年,是年3月安特生在周口店鸡骨山考察了两天,但收获不大。1921年,安特生又同奥地利古生物博士师丹斯基(O.Zdansky)第二次来到鸡骨山采集化石,经当地村民指点,在鸡骨山以北2000m处的龙骨山,即北京人遗址,发现了他们从未见过的肿骨鹿头骨和下颌骨等骨骼化石。至此安特生预感到远古的人类很可能在这里居住过,他大胆提出,要在这里寻找我们人类的祖先。1926年,师丹斯基公布了从周口店所采集化石中的2颗人类牙齿化石,在学术界引起了轰动。北京协和医院解剖室主任、加拿大学者步达生(Black Davidson)看了之后也认为是人牙化石,从而对周口店极感兴趣,开始与农商部地质调查所丁文江、翁文灏所长联系,并由步达生与美国洛克菲勒基金会联系申请资助,由中外合作共同研究,系统发掘周口店化石产地。1927年发掘工作开始,由李捷和瑞典学者步林负责,并于同年在将要结束发掘工作的前3天,即10月16日下午找到了一颗人类下臼齿化石,经步达生研究,属人牙化石,与之前师丹斯基发现的很相似,为此,步达生命名为"中国猿人北京种",后改称为北京直立人,简称北京人。1928年挖掘发现工作继续,由我国学者杨钟健主持,裴文中负责发掘,这一年又发现了2件下颌骨,上边还有3颗完整的牙齿。下颌骨是人类化石中较珍贵的材料。1929年继续发掘,由裴文中主持。裴文中接续上一年的位置继续往下挖,除发现了更多的肿骨鹿下颌骨和几颗人牙外,更重要的是于1929年12月2日下午4时在主洞的支洞中发现了北京猿人的第一个头盖骨,揭开了人类发展史上的重要一页。由于头盖骨的发现,奠定了中国猿人坚实的科学基础,因此猿人遗址的发掘工作年复一年地继续。1931年贾兰坡和卞美年也参加了周口店的发掘工作,并在这一年还确认了北京猿人使用的石器和用火遗迹。1935年裴文中赴法留学,周口店发掘工作由贾兰坡主持,并于1936年11月在不到半个月的时间内便发掘了三具保存完整的北京猿人头盖骨,这一消

息再次震动了世界学术界。1937年7月7日的"卢沟桥事变"使发掘工作被迫中止。1938年日军占领周口店,野外工作全面终止。

自1927年至1937年的11年间,在北京猿人遗址所获得的猿人化石是:完整头盖骨5块,破碎头骨9块,破碎面骨6块,下颌骨11块,牙齿147枚,股骨7段,肱骨2段。这些骨骼和牙齿化石,估计来自40个不同的男女老幼,代表了一个相当完整的居群,这在世界上是罕见的,所以至今仍被誉为世界奇迹之一。遗憾的是这批国宝却存放于前北京协和医院B楼解剖科的保险柜里,1941年珍珠港事件爆发后,侵华日军从美国人手中掠走了这批珍稀标本,至今仍去向不明,成为世纪之谜。

1949年后对周口店北京猿人遗址又进行了多次发掘,新获得牙齿5枚,股骨2段(上臂骨和小腿胫骨各1块,其中胫骨化石是首次找到的新材料),完整的下颌骨1块,猿人头盖骨1块,这也是迄今保存在我国的惟一头盖骨了。以上周口店丰富的化石资料让世人确信,北京猿人是从猿到人进化过程的一个重要环节。

据古人类学家多方面的对比研究,北京猿人的身体特征是"像人的身体却配上一个像猿的脑袋",前额低平,颜面向后倾斜,脑容量较小(1075ml),额下的眉骨嵴非常粗壮并向前突出,相互连接,颅骨顶的正中有明显的矢状嵴,头骨后部有突的枕外隆起,头盖骨厚度几乎比现代人厚1倍(约10mm)。鼻骨宽,鼻梁低,颧骨高,嘴巴大,没有下巴颏,牙齿比现代人粗壮硕大,但上肢骨与现代人相似,可知北京人完全能独立行走了,据股骨长度推算身高为156~157cm,相当于现代比较矮的黄种人。北京猿人的劳动工具基本上是石器,此外还使用了少量骨器,计有用鹿角加工而成的角工具,用头盖骨制成的容器,以及用躯干骨制成的尖状器、刀状器和刮削器等。北京猿人用火的证据比较充分,经实验分析均为炭渣。与北京猿人伴生的动植物群,经过几十年的发掘后认定,植物群比较简单,属温带针叶与阔叶混交林的植物群;动物群比较复杂,以哺

乳动物最多，有97种，计有食虫类5种，翼手类4种，肉食类30种，啮齿类32种，奇蹄类3种，偶蹄类16种，长鼻类1种，灵长类2种，以及其他哺乳动物化石4种。此外还有淡水和陆生腹足类9种，两栖类4种，爬行类4种，鸟类62种，鸟类中有北方繁殖的草原沙漠生活的鸟类10种，其余为生活于丛林地带的鸟类。鸟类的发现在世界古人类化石遗址中极为罕见。综上所列化石可知，北京猿人生活的自然环境为北温带略偏暖的环境，相当于现今黄河以南，河南南阳以北的自然环境，不过北京猿人则生活在山林和草原之间，可能与近代过着原始生活的狩猎采集部落类似，其食物结构推测1/3来自狩猎，2/3来自植物，以及容易捕捉的水生生物，可见肉食在人类演化食谱中是占有相当份量的。北京猿人的寿命，据美籍德裔古人类学家魏敦瑞对40个北京猿人个体研究后所得出的寿命为：死于14岁以下的占39.5%，死于30岁以下的占7%，死于40~50岁的占7.9%，死于50~60岁的占2.6%，寿命无法确定的占43%。由此不难看出，北京猿人的寿命是相当短的，此与捕获等劳动强度过大、营养需要不可能有充分保证有关。北京猿人在周口店洞穴中生活劳动的时间，比较有把握的估计为从65万a前开始到23万a前止。周口店遗址是北京猿人一个较永久的栖身地，也是比较复杂工具的制作场和人兽争夺的场所。即使是最原始的人类，也是当时的万物之灵，它们必须利用集体力量，利用工具和火才能驱赶野兽，才能在如此长的时间内主宰着周口店猿人洞。

092 人类进化的新概念及生命的未来

当今的现代人除达尔文(1871)所说的“两足直立行走”部分或全部为“车行走”所替代外，“大的脑子和高的智力”已得到了——即使不是淋漓尽致的发挥，也是已经发展到相当高的智力水准了。至此不禁要问：地球人还能进化吗？生命的未来是什么？我们将

去向何方？这些都是十分有趣而又难以回答的问题。

人是从古猿进化而来的，在进化过程中，人与古猿的体质形态有了很大变化，但当人类脱离了野蛮，进入文明时代以来，体质形态的变化是不明显的，趋于"冬眠"状态，而进化最快的则是科学技术和知识文化，这就是为我国著名人类学家吴汝康教授(1997)所称之的现代人的"体外进化和精神进化"。此与普通生物进化不同，普通生物进化主要是以遗传基因改变为基础的生物形体结构上的变化。

体外进化：人类的重要特征之一是能制造和使用工具，"人与猿的真正区别在于人会制造工具，只有到能制造工具时才算是人了"(贾兰坡等，2000)。在人类进化史上，古人类最早使用的工具是天然石块(天然工具)，250万a前开始打制石器工具，50万a前开始用火，20万a前开始使用工具取火，3～4万a前发明了复合工具，并使用工具建造人工住所，1万a前开始使用磨制石器和陶器，开始生产食物、农耕和定居，5000～6000a前人类发明了金属工具，促进了技术交流和生产力的发展。至近代，18世纪下半叶，发明了蒸汽机，由繁重的手工劳动时代进入大工业时代，19世纪下半叶发明了电力，人类进入了电力时代，使用电动工具，20世纪下半叶发明了电子技术、计算机互联网技术、卫星通讯技术、克隆技术、航空航天技术等。这些技术实际上都是某种工具，是人类的"人工器官"，是对人类天然器官部分功能的模拟，是对人类天然器官阈值的超越，因而都是人类肢体的延伸和扩展，从而大大提高了人类肢体(四肢)的力量、速度和功效。而各种各样感觉器官(五官)辅助工具的出现，又大大提高了感觉器官所涉及的广度和深度，如射电望远镜使人的视力越过了银河系，电子(离子)显微镜使人的视力深入到微观世界内部，载人航天使人的视力直接深入到太空等，这些都是人的感觉器官在感受领域(体外)的延伸。日益完善的计算机的出现，开辟了人工智能的道路。虽然电脑不是人

脑,但却是人脑(思维器官)的体外延伸,不仅解放了人的脑力劳动,而且为人类认识能力的进一步发展开辟了广阔的天地。在当今人类发展到其自身离不开电脑的时代,电脑就会愈来愈成为人脑在功能上不可分割的辅助物,以致成为受人脑和电脑一起控制的"新人",而人的自然存在状态和器官功能,其独立性也将会愈来愈小。

人类在从猿到人的进化过程中首先解放的也是使用工具的上肢,然后是两足直立行走,直立姿势为感觉器官获得外界信息提供了条件,外界信息量的增加促进了大脑的发达,以至脑在体外延伸。这种从猿到人的进化过程与当代人类的体外进化顺序有着明显的一致性。

精神进化:科学文化水平和思维方式演化是精神进化的两个重要方面。在人类精神进化的历程中,与个体和手工劳动相适应的是以个人经验为中心的思维方式,在古代中国和古代希腊,虽然朴素的唯物主义哲学思想强调对自然界整体性和统一性的认识,但这种认识是模糊的和笼统的。工业革命时代,功利主义是思维的中心,一切只顾眼前利益,走向各种极端,使生态平衡受到了极大的破坏。近代科学的兴起,使分析型思维方式处于主导地位。所谓分析型思维即撇开总体联系来单个考察实物的过程,在哲学上称形而上学思维,但它在细节的深入考察方面比古代哲学前进了一大步。现代科学技术,特别是高科技的发展,为人类的系统思维提供了定量方法和计算工具。在社会实践普遍大型化、复杂化和全球化的条件下,国际互联网和数字化技术缩短了人们的空间距离,增加了时间效果,与此相适应,人的思维方式也发生了明显变化。优先考虑社会发展的整体性、统一性及系统性,以及可持续性等综合性思维,人在体外文明时期使自然界"人类化",而在精神文明时期又促使人类走向"自然化",即理性地顺应自然规律而达到人与自然的和谐,从而在21世纪使地球人的思维和理智得到了



延续和进化。

高科技的发展和人类思维方式的改变，加之在人类进化史前的两次大灾变[①] 并没有使生物的进化得到终止和绝灭，所以于20世纪六七十年代有人提出人类有文化，有特殊性，未来的发展可能没有灭绝的问题。但是已发现的化石记录却表明，共同生存了100多万a的纤细型和粗壮型南猿，到最后粗壮型灭绝了。原先以为能人是一个种，后来的研究表明是两个种，其中一个种进化成直立人，另一个种灭绝了。根据20世纪90年代的调查，全球平均每天有一种动物、每分钟有一种植物灭绝，是300年前生物灭绝速率的1460倍，预计现在物种的2/3将在21世纪灭绝。

美国普林斯顿大学天体物理学家戈特三世(1993)认为，人类与其他生物一样在宇宙中没有特殊地位，并提出了计算人类生命未来的下列方程式：[②] 1/39过去的时间 < 未来的时间 < 39 ×(过去的时间)。

根据有关文献，戈特三世认为大多数物种的平均寿命为100万～1100万a，哺乳动物是200万a。目前智人已生活了40万a，代入以上方程式可得出：

$$400000/39 < \text{未来时间} < 39 \times 400000$$

$$\text{即：} 10256\ (a) < \text{未来时间} < 156 \times 10^5\ (a)$$

也就是说，人类可能在10 256 (a) 至 156×10^5 (a) 之间灭绝，其概率为95%。

生命是一个过程，“生就意味着死，一切产生出来的东西，都一定要灭亡。新的事物不断地产生，旧的事物不断地灭亡，然后又是新的产生，旧的灭亡，循环不已，这是不可违抗的客观规

① 第一次是古生代过渡到中生代时，因环境恶化使95%的动植物遭到了毁灭，第二次是6500万a前的恐龙大灭绝。

② 引自吴汝康《人类的起源和进化》，1997。

律”（吴汝康，1997）。人类生活在地球上，而太阳和地球，据天文学家研究，到一定时候也都要消亡，人类当然也不能例外，然后生命的最高形式再在另外的地方和某个时候重新产生出来。人类至高无上的智慧和力量可能也就在于此吧。

193 生物进化的自然规律

根据迄今的古生物学、细胞和分子遗传学的研究，地球生物进化的主要自然规律是进步性、多样性和不可逆性。生物进化的速度是从低级到高级的加速进化，生物进化是公认的物质运动的最高形式。

进步性：是生物进化的主流。由古生物化石时间顺序的垂向对比可知，愈是古老地层中的化石种类愈低级，愈单一，结构也愈简单，与现代生物的差别也愈大，而年轻地层中的化石则相反。随着地质时代的推移，生物化石始终表现出愈来愈复杂、愈来愈进步、愈来愈高级的进化主流。例如从前寒武纪的藻类植物到泥盆纪以后兴起的蕨类植物，再到侏罗纪的裸子植物、白垩纪的被子植物，随着这一演化进程，每一类植物从个体构造到器官功能都较前一类更加复杂、更加高等。即使是同一类植物，例如藻类植物，在太古代蓝藻仅是原始单细胞藻类，到新元古代才分化出了多细胞藻类，而真正高等藻类则出现于寒武纪。可见藻类这一大群也具有进步向上的演化趋势，即进步性。在动物界，也同样可以看出这种演进趋势，从新元古代以后陆续出现的各类原始无脊椎动物到志留纪以后不断涌现的各类脊椎动物，无论在形态结构上还是生理机能上均体现了这种进步性演化。以消化机能为例，原生动物（如变形虫）是细胞内消化，腔肠动物（如水螅）虽仍是细胞内消化，但已出现能分泌消化液的腺细胞，环节动物（如蚯蚓）已有了完整消化道，发展到无脊椎动物的节肢动物（如昆虫），细胞外消化已趋完善。在脊椎动物中消化道的食

管、胃、肠分界十分明显，并出现了各自的消化腺体，细胞外消化更加完善。到了哺乳动物，消化系统已得到了根本的改观，除消化系统外，动物的其他系统如呼吸、循环、神经、生殖、内分泌等也都经历了一个由简单到复杂的进步过程，而这种生理机能的进步，又反过来增强了它们对环境的适应能力，在各自的进化中起到了推动作用。

多样性：生物进化既有纵向的阶段性发展和突破，又有横向的分枝性发展和扩散。纵向上是生物发展水平的提高，横向上是生物由少到多的分化，结果使地球上出现了众多的古生物种类，大致沿三个纵列即植物、动物和微生物而向前发展。植物主要是靠光合作用获取营养的一类生物，它的出现保证了地球其他生命体的顺利诞生。动物是靠摄入现成有机食物获取营养的一类生物，为了能寻找和争夺到食物，在进化过程中，它们都朝着神经和运动系统机能不断加强的方向发展，体现出反应的灵敏性和运动的灵活性，与之相适应出现了高效代谢系统。微生物是靠吸收方法获取营养的一类生物，它们与养料接触通过分解而吸入体内。为了加强吸收进化过程，生命体越来越小，因为体积越小表面积相对越大，表面积越大对吸收越有利。此外细小的身体可以无孔不入，扩大摄取各种营养的范围，再加上微生物繁殖力极强，数量多，分布广，这一切都有利于微生物适应各种环境。另外，生物进化方式也存在着多样性，除复式进化（生物纵向发展进化）和分化式进化（横向发展进化）外，还有特化式进化和简化式进化。马从多趾向单蹄方向进化，剑齿虎异常发达的犬齿，仙人掌的叶变成针刺状等均是特化进化的结果。特化进化的生物一般只能适应于某种特定的生活环境，当环境变化时因无法适应而常导致物种绝灭。因此特化生物很容易造成生物进化的盲枝。简化式进化又称退化，也是生物进化的一种方式。生物的不同进化方式促使生物发展出现了多样性。

不可逆性：也称生物进化的不可逆规律。所谓不可逆规律包含了两方面的含义：一是已演变出现的生物不可能再回到祖先的类型；二是已经绝灭的生物不可能再重新出现，也就是说，凡是进化了的生物就不可能再复原了。例如由爬行类进化的哺乳类，不可能再重新变为爬行动物；人类的祖先是猿类，猿类的祖先是猴类，人类当然也不可能再回到猿猴时代；某些生物即使能重新回到其祖先生活的环境，它也必须产生某些新器官来执行其回复生存的生理功能。例如龟、鲸、海豹等动物，虽然又回到了水中生活，但它们的呼吸器官不可能再恢复成鳃，而只能是肺。又如鸟类的祖先原来是有牙齿的，现牙齿已退化不可能再生，即使是食肉性的鸟类，也只能用它们的角质喙来切割食物。生物进化的不可逆性告诉人类，地球上的一切生物，特别是濒危生物，一旦在地球上消失，那就再也不会重新出现了。因此人类必须重视对生物多样性（包括基因、物种和生态系统）的保护，维护好地球村的生存基础。

生物进化的速度：生物进化的速度是逐渐加快的，愈是高等生物进化速度愈快。从已发现的不同地质时代的化石记录可知，从36亿a至18亿a的长达18亿a的时间内，只完成了从原核生物到真核生物的进化，而从18亿a至3.5亿a的约15亿a时间内生物开始发生大分化，分化出了植物和动物，植物中有藻类和蕨类，动物中有无脊椎动物以及鱼类和两栖类。从3.5亿a至现代，虽然只有短短的3.5亿a，但却发生了一系列重大进化。植物方面，完成了从蕨类植物向裸子植物和被子植物的进化，而被子植物则又在短短的1亿a中，从无到有，发展成一个拥有300多科几十万种的植物大群，而动物方面则从爬行类到鸟类到哺乳类再到人类，其发展是非常迅速的，其中从爬行类的衰落到鸟类和哺乳类的繁荣仅仅用了几千万年的时间，生物进化的这种加速度的确令人不可思议。当然这是就生物进化的整体而言的，就某



些生物个体而言，进化又相当低速，例如植物中的水杉和银杏，动物中的蟑螂和鸭嘴兽等，时至今日，从外部形态到内部结构都与它们祖先的模样相差无几，因此常将它们称为“活化石”，可以为研究古代生物提供“活”的标本。

还需要指出的是，在人类出现以前的这种生物进化是自然进化，符合一定的客观规律，而人类出现以后特别是在当代，混乱的人为因素在生物进化的过程中所起的作用已越来越大，已经能够在较短的时间内影响到某一物种的兴旺、变异和灭绝，因而生物的进化已不再是一种单纯的自然发展过程了。

094 生态系统进化幕

生态系统是由生物与非生物环境各个相互作用的部分组成的组织化整体，是一个靠外部能量输入和内部能量消耗而维持其有序（组织化）结构的开放系统。当生命于35亿~38亿a前出现在地球上时，最早的、最简单的微生物生态系统就建立起来了。自那以后地球上的生态系统经历了一系列不可逆的改变，并随着地质时代的推移而趋向于复杂化和有序化。就广义的进化概念而言，生态系统的历史演变过程是一个进化过程，因此生物与非生物环境之间的相互作用是物种进化的制约因素之一，但它并不是生物学意义上的进化，与基于遗传系统的生物学进化过程也不同。

在地球历史上，由于生态系统进化过程中发生过多次灾变事件，而每次灾变都引起地球环境的显著改变和生物种群的替代，以及大范围的生态重建，所以造成了生态系统进化呈现出“一幕接一幕”的演变特征，每一幕都有不同的环境背景和不同物种，特点是明显的，据此可划分为5个生态系统进化幕。

EE1：距今年代为38亿~35亿a，相当于古太古代早期，是生命起源早期，为最早的微生物生态系统。生物组成可能只包括

有机物生产（化学自养细菌）和还原分解（异养细菌）两部分，微生物生态系统简单。地球环境特点：地壳刚刚形成，大气圈为缺氧还原性向以 CO_2 为主的酸性过渡的大气圈，原始海洋形成，深度为 1000～2000m，海底喷气及水热活动普遍而强烈，海水温度较高，在 80℃以上，海水具还原性，含 H_2S、H_2、CH_4、NH_4^+ 及某些金属离子，可能还含有 HCN、HCHO 以及某些有机分子，它们都来自水热喷口。最早的原始生命可能是生活于水热环境中的化学自养（利用甲烷和氢）嗜热古细菌或真细菌。而热水环境可能在太古宙普遍存在。生态系统占据的空间范围，为海底热喷口附近（深海—半深海海底水热环境），因为海底较地面相对稳定和安全，并有利于生命和生态系统的进化。

EE2：距今年代 35 亿～20 亿 a，相当于古太古代晚期至古元古代早期，是光合作用起始阶段，是以不生氧光合作用的光合细菌和原始蓝藻为主体的浅海底栖微生物席生态系统。地球环境特点：大规模稳定地块形成，海水温度下降，大气圈中 CO_2 含量逐渐下降，但大气圈仍然缺氧，表明这种光合作用可能是不生氧的光合作用。在与大规模稳定地块形成的同时，还出现了大面积的浅海陆棚和浅海盆地，微生物生态系统由深海底水热喷口附近扩展到浅海有光带，形成席状微生物群落，但生态结构仍然简单。

EE3：距今年代 20 亿～10 亿 a，相当于古元古代晚期至中元古代，为大规模蓝藻叠层石礁和浮游生态系统的建立和发展阶段。地球环境特点：随着生氧光合作用蓝藻和真核藻类的出现和繁荣，大气圈自由氧累积，氧化大气圈形成。海水碳酸盐岩形成巨大的蓝藻生物礁，使大气中 CO_2 含量急剧下降，海水温度和气温降低。臭氧层形成，太阳紫外辐射减弱，海水表层可供生物生存，浮游生态系统出现和发展。由于海洋有机物生产增加，为异养生物出现和发展提供了条件。生态系统内增加了消耗者（异养生物）的中间环节。生态系统占据的空间为浅海底和海洋表层水

域（有光带）。

EE4：距今年代10亿～5.7亿a，相当于新元古代，是以浅海底栖多细胞藻类植物和无脊椎动物为主体的生态系统及以单细胞真核藻类植物和原生动物为主体的浮游生态系统。由于大气圈CO_2含量继续减少，导致全球性气温下降，形成冰川。海平面及海水化学成分变化造成蓝藻叠层石生态系统的衰落和解体。后生动物和后生植物出现，发生了生命历史上第一次较大规模的灭绝和较大的适应辐射，海洋生态系统进一步复杂化。生态系统占据的空间范围为海洋表层及中下层水域。

EE5：自5.7亿a前至现代，显生宙生态系统建立，动物和植物的歧异度增大，物种替代频繁。地球环境特点：陆地土壤形成，大气圈氧含量上升，全球气候分带，环境分异。随着环境分异，物种多样性大增，生物与环境之间的相互作用，生态系统内物种之间的竞争和相互依赖关系加强，物种灭绝和新种形成速率加快。生态系统占据的空间为海洋、陆地、陆上水体和大气圈。

095 物种灭绝与生态保护

地球化石记录表明，在漫长的地质历史时期曾经有过大量古生物物种灭绝。根据灭绝的量级可以分为正常灭绝和大灭绝。正常灭绝在整个地质历史时期都可以发生，是种系代谢的正常过程，通常为属和种一级的灭绝，表现为分类群中部分物种的替代，为灭绝率较低的常规灭绝，也有称种系灭绝或假灭绝的。大灭绝则是在地质历史的某个时期较集中发生的灭绝事件，故亦称集群灭绝，常有下列特征：灭绝率高，大大超过常规灭绝速率；所灭绝的类群分类等级高；波及全球或较大地区；生态系统发生巨大变化；经历时间短，几乎近于同时。

从灭绝地层化石记录位置看，自有生物史以来，几次大的生物类群灭绝发生在新元古代末期（距今约6亿a左右），寒武纪

末期（距今5.10亿~5.05亿a），奥陶纪末期（距今4.39亿a），晚泥盆世弗拉斯期（佘田桥期）/法门期（锡矿山期）之交（距今3.7亿a），晚二叠世（距今2.55亿~2.50亿a），晚三叠世诺利末期（距今2.15亿~2.10亿a）和晚白垩世（距今0.65亿a）等时期，其中以二叠纪末期的灭绝最为强烈，全球海洋无脊椎动物物种的90%以上和陆生脊椎动物物种的70%，在此期都灭绝了。美国古生物学家N. 纽维尔（1962，1967）统计了显生宙海洋和陆地无脊椎动物化石的分布，根据科一级生物门类的新生与灭绝，绘制出变化曲线图，显示出6个灭绝高峰，即495Ma（$\in_3$）、435Ma（O_3）、365Ma（D_3）、251Ma（P_2）、203Ma（T_3）及65Ma（K_2），加上新元古代伊迪卡拉动物群的突然消失则总共有7次。

为什么会发生全球规模的大灭绝？学者们认为主要原因有三个方面：1. 生物自身的特化。当生物在稳定环境中特化时，它们往往失去遗传变异性，很难去适应环境的巨大变化，此外生物类群之间的竞争性加剧，也是加速灭绝的原因之一。2. 地球自然环境变迁，全球规模的海退，陆地面积扩大，海平面降低，气候季节性增加，适于浅海生物栖居的海域大幅度减少，以及滞流缺氧环境等都可造成生物的灭绝，全球规模的火山活动也能造成生物灭绝。3. 地外天体（小行星、彗星）撞击地球，地球表层地质灾害的群发，以及地球与太阳之间距离的周期性变化，太阳穿过银道面时不同天体之间的引力扰动和引潮效应都有可能诱发生物灭绝事件的发生。

生物灭绝对某些生物类群来说虽是毁灭性的打击，并使地球上原来稳定平衡的生态系统失去了稳定平衡，但它却为新生态系统的建立创造了条件。因为新生物类群及其生态系统在老生物类群占优势的情况下是难以发展的。以哺乳类为例，虽然哺乳类的祖先在恐龙时代就已经出现了，但在恐龙的阴影下很难发展，恐

龙的大灭绝为哺乳类的兴旺开辟了道路。裸子植物在中生代的大量灭绝为新生代被子植物的发展腾出了空间。不过历次大灭绝后的化石记录也表明，新生物类群及其生态系统的复苏是相当缓慢的。恐龙等生物在白垩纪末期大灭绝之后，古新世时的哺乳类经过长期缓慢的适应辐射才占领了恐龙等生物灭绝后空出来的环境，直到始新世初期才恢复到白垩纪时的生物多样性及生态环境水平。这种灭绝与新生态平衡的认识为当今地球上的统治物种——人类提了个醒，如果人类不去维护经过长期进化而形成的地球生物多样性及物种与物种之间所构成的食物链，并使不同物种的生物同处于一个共存的生态系统中，则必然导致生态系统的破坏，生态系统的破坏则又必然导致以生物为核心的能量流动和物质循环的中断，从而产生多米诺骨牌似的推倒效应，到头来引起灭绝的不仅仅是现存的动植物，人类也必然遭到厄运。

对人类未来的理性担忧，促使现代人类必须投入行动，这就是保护地球生态环境，保护生物圈，保护生物多样性，走可持续发展的道路，与整个生物界及其生态系统重构和谐，共同进化。

五、地球的未来

096 数字地球

数字地球是美国前副总统戈尔于1998年1月31日在"数字地球：21世纪认识地球的方式"演讲中提出来的地球新概念。戈尔说："数字地球是一种可以嵌入海量地理数据的高分辨率的关于地球的三维表示。"美国宇航局和联邦地质调查局的数字地球概念是，"关于我们星球的虚拟现实的表现，它使人们能够体察和应用巨量的、自然的、文化的和历史的有关地球的综合数据"。通俗的说法就是用数字方法将地球及地球上的活动，以及整个地球环境的时空变化装入电脑中，实现在网络上的流通，并使之最大限度地为人类服务。很明显数字地球是信息科学、空间科学、地球科学等相关学科相互交融的前沿。数字地球的技术基础主要包括信息高速公路和计算机宽带高速网络技术、高分辨率卫星遥感图像、空间信息技术与空间数据基础设施、大容量数据存贮技术、科学计算以及可视化和虚拟现实技术。虚拟现实技术可为人类观察自然、审视景观、了解实体提供身临其境的感觉，是数字地球进入各行各业的关键技术之一。

数字地球，虽然几乎涉及所有的科学领域及所有学科，但最直接的则是地球科学，因为地球科学所研究的对象是全球性的，如地球的外部结构、地形、地貌、资源、环境及其变迁，海陆交互作用及海平面变化，地震、火山及其他自然灾害的调查研究及预测，地球内部结构、运转及动力学机制，地球磁场的形成、磁极倒转及影响，地球重力场的观测研究及应用等。为了适应数字

地球的发展，首先应当将地球科学数字化。要实现地球科学数字化，就我国而言，主要有以下几个方面的问题（马在田，2000）。

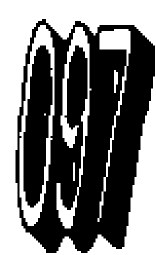
实现数据共享：目前我国气象、海洋、测绘、资源、环境、灾害等领域包括地球观测和通过卫星所获得的数据还未实现共享。当然数据共享是有范围的，然而我国目前还没有一个统一的国家权威数据交换中心，大量的地球数据还分散在承担观测的一些国有企事业的设施落后的数据库房中，成为本单位的私有财产，使国家的投资和财富变成各个单位所有，此与当今信息时代与实施数字中国和数字地球工程是背道而驰的，因此国家必须尽快采取法律的、经济的，以及科学技术等方面的措施，建立国家级数据交换和共享中心。地区级和地域级的数据共享交流中心也是必要的。全球级数据地球是未来发展的目标，也是全球人类可持续发展的需要，然而问题比较错综复杂，在全球范围达到什么样的卫星影像分辨率（空间、时间、光谱）的数据可以共享、可以交换就是一个简单而复杂的问题。例如我国的 GPS 精度是 30m，而美国可达 1m（军用甚至可达 0.10m），如果要共享，那么即使是有偿的，看来也不会是自由共享，因为全球数据共享既要考虑全球利益，也要考虑各个国家的利益。因此努力提高我们自己国家的数据观测精度和观测数量是实现数据共享的基础。

培育数字地球科学家队伍：据有关调研，包括美国等发达国家在内的地球科学家队伍，目前都不大能适应数字地球的建设和发展。以我国为例，之前的我国地球科学家，除知识面相对较窄，计算机使用与信息处理能力明显不足外，“我们的地球科学家，由于历史和社会的原因基本上是三级学科的专家”，以致于培养出来的不少青年一代“博士不博”、“硕士不硕”，缺乏创新能力。因为现代科学创新，没有广博的知识，只靠在某一方面长期熟练的工作经验是无法实现的。现代科学各个学科的发展要求科学家既要具备本学科的精邃知识，又要有与本学科领域相关学

科的广博知识，其创新点一般都是本学科或学科领域与其他学科的交叉点。

建设数字中国和数字地球：在科学、经济乃至文化逐步走向全球一体化的今天，数字地球的提出预示着一个新时代的发展方向，美国可以利用它实现美国的国家目标和全球战略，中国同样可以利用它来实现中国的国家目标和全球战略，这之中的关键在于我们能否发展自己的数字中国和数字地球。这又与我国的经济实力、科技实力、人才实力以及管理体制、运行机制等密切相关。

数字地球的建设与发展将加快全球信息化的步伐，在很大程度上改变人们的生活方式，并创造出更多的社会财富，为人类社会向更高层次发展做出巨大贡献。



全球大洲大洋的重组

翻开世界地图不难看出，辽阔的海洋和大陆是地球表面自然景观的两大地貌单元。除南极洲外，所有大陆似乎都是成对的，例如北美洲和南美洲、欧洲和非洲、亚洲和澳洲。大陆相对集中在北半球，但北极是海洋；海洋相对集中于南半球，但南极是大陆。大部分大陆北部较宽，南部较窄，像一个底边朝北的三角形，此即地球大陆“倒△”之谜。南北半球各大陆均西部凹进，东部凸出，非洲西海岸和南美洲东海岸，红海两岸在形态上明显对应。海洋中的大多数岛屿分布在大陆东岸，岛弧也分布在大陆东岸。岛弧一般向东凸出，外侧则为一系列深海沟。

这种分布态势据 20 世纪后半叶多方面的调查研究证实，之前是一个统一的大陆，即联合大陆或泛大陆（Pangea），中生代开始解体，至新生代逐渐漂移到现今的位置。在地球 40 亿 a 的历史上联合古陆曾有过多次聚散，据王鸿祯教授（1997）等研究在 2500Ma （Pangea 0）、1900Ma （Pangea Ⅰ）、1400Ma （Pangea

Ⅱ)、800Ma（PangeaⅢ）及 250Ma（Pangea Ⅳ）均有联合大陆的拼合。最近一次联合大陆（Pangea Ⅳ）的拼合开始于 250Ma 左右，大约延续了（180～190）Ma[①]，至新生代才裂解成现在的海陆格局，也就是说，今天的各大陆（大洲）就是昨天 Pangae Ⅳ 所裂解的巨大碎块。这些巨大裂解碎块经地质地球物理研究，已至少有（60～70）Ma 的漂移史了，目前仍在漂移。根据美国航天局在人造卫星上安装的激光射线和精巧原子钟对地球的观测发现，目前大西洋东西两岸的漂移速度为 1.5cm/a；夏威夷与美洲大陆之间以 5.1cm/a 的速度在靠近；澳大利亚与北美大陆之间则以 1cm/a 在扩大。我国和日本应用发自宇宙的电波进行联合研究发现，日本茨城鹿岛町与我国上海间的距离在缩短，速率为 2.9cm/a。再如对冰岛裂谷（大西洋中脊裂谷的延展部分）和北美圣安德列斯断层（陆上转移断层）的空间大地测量表明，它们则正向相反方向，即由开裂向联合方向转化，前者（冰岛裂谷）的现代扩张速率约为 1cm/a，后者（圣安德列斯断层）的现代错动速率为 4cm/a。从地质尺度看，这是相当快的。位错方向，西盘（太平洋板块）相对东盘（美洲板块）向北移动。按这样的速率和运动方向，据美国学者 R.S. 迪茨估计，大约在 1000 万 a 内，远在旧金山（美洲板块）南面的洛杉矶（太平洋板块）将与旧金山并列在一起（但还在大陆上）。大约在 6000 万 a 内，洛杉矶以及圣安德列斯断层西侧的下加利福尼亚和加里福尼亚长条形地带将最终滑到阿拉斯加以南的阿留申海沟内。

科学家们还发现，欧亚板块在与邻近板块相互碰撞、相互挤压的作用下，每年平均上升 0.2～0.5cm。据此可以推断，我国台湾海峡约在 1.5 万 a 后变为陆地，那时，台湾将与祖国大陆在

① 也有研究者（National Research Council，1993）认为，Pangea Ⅳ 是短命的，只存在了 90Ma。

地理位置上合为一体。大西洋现正以1~4cm/a，印度洋正以1~3cm/a的速度在扩张。照此扩张速度，未来5000万a内，大西洋的宽度将增大1000km左右，印度洋将增大500~800km。随着大西洋、印度洋的张开，太平洋将进一步收缩，其收缩宽度估计不小于1000km。但有不同意见，邓晋福等（1996）认为，作为泛大洋的太平洋，似乎既不断消减（收缩），又不断增生（扩张），东太平洋洋脊玄武岩只有亏损型，说明它不曾被联合大陆覆盖过。看来太平洋作为长期存在的泛大洋的可能性是存在的，这一点与它之前的古大洋不同，与现代大西洋和印度洋也不同。

近年来俄罗斯通过卫星监测发现，由于印度板块以5cm/a的速度向喜马拉雅山推进，从而使喜马拉雅山和青藏高原更为高耸、更为雄伟。根据最近观测，喜马拉雅山的上升速度的确为5cm/a，10000a以后喜马拉雅山将隆升至10000m以上当不是什么奇怪的现象，除非10000a内印度板块南缘出现海沟。非洲板块的北移将使地中海和比斯开湾不断收缩，到最后地中海将全部闭合，非洲和欧洲将聚合在一起，其间因碰撞将升起新阿特拉斯山。新阿特拉斯山—阿尔卑斯山—喀尔巴阡山—喜马拉雅山将共同构成一道东西向的世界屋脊，南欧将变成庞大的东西向山地国家的一部分。

非洲大陆的裂解将是激动人心的，现正以2cm/a的速度相背离。南起莫桑比克赞比西河，北到红海，全长4500km的东非大裂谷最终将完全裂离。裂谷东西两侧的东非次大陆和西非将被推挤离开原非洲大陆主体，分别向东西两侧漂移，可能在2亿a之后，其间将诞生像今天大西洋一样宽阔的崭新海洋，届时干旱的非洲大陆将出现绿色生机。

澳洲大陆也将继续向北漂移，它将冲击爪哇和苏拉威西诸岛，5000万a后可能与中国东南沿海相遇和拼接（图097-1）。

由于大西洋的不断扩展，现在比较稳定的美洲大陆东缘有可



图 097－1　未来 5000 万 a 的全球板块图像

（南极洲基本保持不动，但可能有稍微的顺时针转动，南大西洋和印度洋继续生长；太平洋在消耗；澳大利亚向北漂移，并与中国东南沿海相遇；非洲东部滑离，由于非洲向北漂移而使比斯开湾封闭，并使地中海实际上被消灭；加勒比海地区也由于受挤压而抬高，形成新的陆地）

能出现海沟和形成俯冲带，届时繁华的纽约、波士顿以及华盛顿有可能变成火山和地震灾区。扩张的印度洋将和新张开的东非裂谷融合在一起。东非次大陆将成为印度洋中的一个新岛屿。太平洋将不停地收缩，一些学者认为 1～2 亿 a 后太平洋可能会完全关闭，而另一些学者则认为东太平洋有可能被保留。但不管是全关闭，还是部分保留，都会使始终赶不上欧亚大陆前进步伐的日本列岛等太平洋西岸岛屿、西进受阻的北美大陆将和欧亚大陆以及快速北进的澳洲大陆逐渐接近和拼合在一起，并有可能再次形成一个由欧亚大陆、美洲大陆和澳洲大陆等组成的联合大陆 Pangea V，日本、美国、澳洲等都将逐渐向中国靠近，中日澳美等将成为东亚近邻，欧洲只能“东扩”而难以“西进”。

实际上，自地球形成圈层以来，它的发展演化可能就是一部“分久必合，合久必分”的历史，即为开裂（分离）和聚合（接近）相互转化的节律性运动体系。开裂的最终结果是形成泛大洋，聚合的最终结果是形成联合大陆。不同地质时期，其地球壳

层的“开裂”和“聚合”形式可能并不相同，但由此而发生的各种地质作用无不与此密切相关，这可以说是板块构造所引出的一个最重要的结论了。

98 从地球到月球到深空

俄罗斯大科学家齐奥尔科夫斯基有句广为流传的世纪名言：地球是人类的摇篮，但人类不能永远生活在摇篮里……时下对走出地球摇篮虽然还有相当距离，但包括我国在内的许多国家，特别是工业发达国家都在为走出地球摇篮，为地球人寻找未来的太空栖息地而孜孜以求。人造卫星、宇宙飞船、月球探测器都是直接或间接为这一目的服务的。1969 年 7 月 21 日“阿波罗 11 号”飞船首次在月面着陆，“行星地球上的人类首次登上月球”拉开了从地球到月球的序幕，实现了人类千百年来登月的愿望。

为了载人登月，从 1959～1998 年，前苏联和美国先后共发射月球探测器 72 枚，有成功的也有失败的（成功率为 64.4%），但不论成功或失败，都是人类的智慧与毅力、想像与创新、勇气与胆量的高度融合。对月球的探测已基本完成了对月球科学数据的采集，编制了全月球的地形图、地貌图、地质图，对月球的空间环境（高层大气、电离层、磁层等）及月面环境（高真空、无或超弱磁场等）和内部结构，以及月球能源、资源的开发利用和转移已有了比较全面的了解，特别是“克莱门汀号”宇宙飞船（1994）对月球的高精度摄影测量，获得了全月球数字地图和彩色地形图，以及许多有价值的专业月图。1998 年“月球勘探者号”环月探测器低高度高分辨率绕月飞行一年，不仅证实月球南极撞击坑永久阴影区存在水冰，月球北极撞击坑永久阴影区的月壤也含有水冰，而且对月球表面的岩石类型、土壤类型进行了系统测量，并完成了月面 U、Th、K、Fe、Ti、O、Si、Al、Mg、Ca 及 REE 等元素的成分分布图，为行星地球人重返月球基地提供

了重要依据。

目前作为地球人走向宇宙深空第一站的月球基地的选址，欧洲空间局的一个研究小组认为，最佳位置为月球南极附近。欧美等发达国家所拟定的月球基地建设共分为五个阶段：1. 无人阶段，为月球基地选址，并画出资源分布图，目前已基本完成。2. 短期滞留阶段，从 2005 年开始，主要是将少数科研人员送上月球，对月岩中的 Fe、Al 和 He 进行勘测。登月人员所需的氧气、食物、饮用水等生活及研究用品由火箭从地球运到月球。3. 经常居住阶段，从 2010 年开始，建立封闭型生态系统。4. 永久居住阶段，从 2020 年开始，建设月球农场和工厂，开始利用 ^{3}He 技术。5. 移民阶段，从 2030 年开始建立月球村。科学家们估计，到 22 世纪月球上将会出现达数百万人居住的月球城市。

我国学者欧阳自远（2002）将月球基地和月球村建设又具体化为 5 个阶段，并计算了建设年限和所需费用。首先是在地球上开发出一套适合月球环境条件下使用的月球资源利用技术，其次是在月球建立临时性月球前哨站，再次是建立永久性月球前哨站，设计中的月球村面积为 3800 万 km^2，是一个多文化、多国度的村庄。联合国已规定，世界各国对月球土地只有使用权，没有所有权，并初步规划了世界各地在月球上的使用面积。因为一个新疆域的开发所体现的不仅仅是一两个国家的需要，而是全人类的需要。

由上述可知，建立月球基地已是指日可待的事，但建立月球基地并不是终极目的，而是要把月球作为走向深空的前哨站，“然后踏上通向未来，通向另一个行星的旅程，载人奔向火星”。[①] 太空学者们所提出的未来两个世纪的星际航行目标，也

① 引自 1989 年 7 月美国前总统布什在纪念“阿波罗 11 号”登月 20 周年时的演讲。

是为未来地球人类所规划的梦幻般的太空家园。

我国政府已正式发布了《中国航天白皮书》，有关部门制定的登月计划将在今后3~8年内分两步，即无人探测和宇航员登月予以实现，届时智慧而勇敢的我国年轻一代，将同世界人民一道，走出摇篮，奔赴月球，飞向太空。

99 天地大冲撞：地外天体冲撞地球

在地球走向其生命终结之前，对地球和现代人最直接的威胁之一则是地外天体对地球的大冲撞，因为据学者们研究，任何直径为1km或更大的近地小行星（NEA）① 的撞击，对地球环境的严重破坏都足以终结目前的人类文明。

航天探测表明，月球、水星、金星与火星表面都密布有大大小小的撞击坑，有的撞击坑直径达数百千米，甚至1000~2000km，而地球作为太阳系的同样行星很难想像它不会遭受地外天体碰撞，况且地球也还正以约11×10^4km/h的稳定速度绕着太阳运行，而太阳又带着整个太阳系围绕银河系中心转动，所以遭受小行星撞击或被“陨击”、“彗击”是正常的宇宙现象。英国天文学家富里（F.Furay）认为，在过去10亿a中，地球可能遭受过13万次以上的重大撞击；也有学者估计在地球40亿a的历史中，至少形成了15万个、直径大于0.80km的陨击坑，其中直径超过10km的约有3000多个；我国天体地质学家欧阳自远（1997）认为地球表面虽屡经沧桑巨变，绝大部分撞击坑已被剥蚀夷平，但仍能找到150多个证据确凿的撞击坑（坑群），这些坑的年龄在几千年到20亿a之间。全球最大陨击坑之一的我国内蒙古多伦陨石坑的撞击年龄为1.4亿a（杨志达，2002），地质时代为侏罗纪到白垩纪。对地球而言，欧阳教授还认为，其被冲

① 轨道可能与地球轨道交叉的小行星被称作近地小行星（NEA）。

撞的几率，平均1亿a有一次直径为10~20km的小天体撞击，形成直径约100km的撞击坑，可诱发全球性剧烈气候灾变与生物灭绝；1000万a和100万a左右分别有一次直径为1~5km和小于1km的小天体撞击，可形成全球性或大区域性严重气候灾害和生物灭绝事件。最近还有学者指出，1km大的NEA大约数十万年撞击地球一次，而直径300m的小天体大约每6万a撞击一次地球。

在20世纪的人类历史上，最为大家熟悉的地球被撞击事件，则是通古斯大爆炸。1908年6月30日7时15分（当地时间），在俄罗斯西伯利亚上空一颗巨大的蓝白色火球以30~40km/s的高速突然冲入西伯利亚明努申边区高空，并在布满沼泽的泰加森林上空发生大爆炸，爆炸产生的冲击波，把方圆2000km^{2}内的树木全部推倒，气浪绕地球转了两圈多，北半球上空出现了巨大的臭氧空洞，持续达4a之久；地磁场发生了扰动，生物的基因也发生了变异，地面出现了120多个小撞击坑。据估计，爆炸能量相当于(1000~3000)万t TNT炸药爆炸所释放的能量，约为1945年在日本广岛投下原子弹威力的500~700倍。目前通古斯大爆炸虽有“陨击”和“彗击”的不同推断，但都是“天外来客”对地球的冲撞，是当今地球的最大劫难之一。

也有的学者认为，在人类之前的地球史上，比通古斯大爆炸更大的地球灾难则是众所周知的被称为祸从天降的恐龙灭绝事件，它发生于6500万a前的白垩纪末，一颗直径约10km的小行星异常猛烈地撞击在墨西哥尤卡坦半岛，撞击坑直径约180km，释放出的能量相当于百万亿吨烈性炸药的爆炸能，大约为投到日本广岛原子弹威力的500万倍，从而导致白垩纪末约75%的生物种属从地球上灭绝，结束了爬行动物时代，开始了哺乳动物的时代，并最终导致人类地位的上升。除这次以恐龙灭绝为代表的地球大劫难外，据我国学者（欧阳自远等，1997）研究，在距今

3400万a、2400万a、1500万a和110万a都发生过直径1~5km的地外天体对地球的撞击，但撞击能量明显小于6500万a的那次撞击。距今最近的撞击是70万a前的一次撞击。这次撞击使全球气温急剧下降，出现了漫长而寒冷的“冬天”和冰期，有一定程度的生物灭绝。

当今地球上观测到的天体撞击事件则是由3位美国天文学家预测到的，被命名为苏梅克—利维9号（SL9）的彗星撞击木星的事件。他们通过观测分析，不仅准确地预告了SL9在1994年7月将碰撞木星表面，而且还预测到由于木星巨大的引力作用，在SL9撞击之前将崩解成21片碎块，并依次撞击木星，彼此撞击时间间隔为4~5h。据撞击后的天文观测，第一块彗星碎块在撞击木星时形成了如地球上氢弹爆炸的蘑菇云，高温气体直冲至10km高度，并在木星表面留下了比地球还大的黑色斑点，随后接二连三的撞击达21次之多。撞击总能量相当于40万亿tTNT炸药爆炸时产生的能量。这次撞击是人类亲眼目睹的第一次天体撞击。看来小天体撞击行星决不是空穴来风，而科学家们的精确预测则更令世人感到震惊和赞叹！

关于地球可能存在的小行星撞击危险，在20世纪90年代末，北京天文台曾发现过一颗编号为1997BR的小行星，它的轨道几乎和地球轨道相切，对地球可能有潜在威胁。美国亚利桑那大学的科学家们发现了编号为1997XF11，直径为1.60km的小行星，它被认为是对地球具有潜在危险性的第108颗小行星，可能在2008年10月撞击地球，但几率并不是很高。这次预测在此后不久又被收了回去。而后美国新墨西哥州自动搜索摄影仪又发现了一颗编号为1999AN的小行星，据意大利比萨大学对1999AN运行轨道所做的分析，认为它将于2027年8月与地球擦肩而过，天文学家们认为撞击的可能性非常小，仅为十亿分之一。

目前世界各国根据天文学家的建议，已成立了专门的国际监

视小组。该小组由20名专家组成，总部设在美国加利福尼亚，其任务是监视、跟踪已发现的240多颗危险小行星。我国紫金山天文台、美国帕罗天文台、欧洲南方天文台，以及法国、澳大利亚、印度等国的天文机构已联手组成一个观测防御网络，对248颗已发现对地球有潜在威胁的近地天体进行实时监测，探索有可能接近地球的彗星和小行星，并计算出它们的精确轨道，以确定它们是否会对地球构成威胁。目前不少国家都已加强了对近地天体的观测，每天晚上各地共有几十座天文台（站）在仔细搜寻来自太空的任何危险物体，只要发现它们有撞击的可能，就将及时发出警报，届时用核武器或拦截摧毁，或迫使小天体转移撞击轨道，改变“飞行路线”。就目前而言，所谓天地大冲撞，即小行星或彗星撞击地球构不成对地球和地球人的威胁，也不可能造成地球人的大灭绝。

100 地球的命运

地球的命运与太阳系的命运密切相关并依附于太阳。太阳的命运与宇宙（指观测宇宙，下同）的未来有联系。对于宇宙的未来，现在还只能是猜想。有两种相互对立的观点：一种观点认为，宇宙现在正加速膨胀，并将一直膨胀下去不再回来；另一种则认为，宇宙膨胀到一定程度后，在引力作用下会变为收缩，最后坍缩到挤压奇点处，或黑洞中的一个奇点处结束。这里的核心问题是主宰宇宙命运的“黑色幽灵”——暗物质和隐藏能量，因为正是它们扮演着星系的形成、星系团的形成以及制约着整个宇宙行为的举足轻重的“角色”，目前正在研究中。

科学家们根据新近发现接近宇宙边缘初始星系所估计的宇宙年龄为120~134亿a，这是一个充满恒星的时代，千千万万个恒星、千千万万个太阳都形成于这个时代。在千千万万个太阳中，目前已知与幸运人类有关的太阳的年龄为50~55亿a（地球年龄

为46亿a)，是其生命演化的中年期，处于主星序阶段。在走出主星序（总是要走出的）后，太阳的外壳膨胀，光度增加，颜色变红，为红巨星阶段，红巨星的大小为太阳的10倍，之后在大约不到10亿a的时间里，太阳将变为白矮星。

在太阳变为白矮星后将继续在太空中闪烁数十亿年，这种白矮星在宇宙中早已存在许多，直到最后像一块即将燃尽的木炭，渐渐地冷却而变成一颗不发光的黑矮星，黑矮星丧失了光和热，也就是说，太阳死亡了，这就是太阳的最后结局。因为太阳终究不是永恒的，其他恒星及其行星也一样。一般认为，从现在起到太阳衰亡大约还有50亿a以上的时间，在这50亿a的时间里，太阳将不断消耗内核里的氢而逐渐变热。在这个过程中地球上的温度也会随着太阳变热而逐步达到和超过水的沸点，这时地球已不适合人类生存，地球上的一切生命将不复存在。事实上太阳在向红巨星发展的膨胀过程中，最终将吞噬水星、金星和地球（如果地球像现在这样“原地不动”的话），最后它甚至还将吞没火星，到那时地球这颗我们赖以生存的美丽行星将灰飞烟灭，永远在太空中消失，地球作为太阳系一颗行星的历史也就算走到了尽头，但这至少是50亿a以后的事情了。实际上到不了地球灰飞烟灭，也就是地球的末日，人类作为生命的最高形式就会再在宇宙的另外地方和另外某个时刻重新产生出来，也许在此之前人类早已移居到邻近星球上进行生命传播了。如果宇宙继续膨胀或永远膨胀下去，这是完全可能的，新的生命和新的智慧是一定能到达更新、更美的宇宙彼岸的。我们应当相信，物质不灭，宇宙永生。

参考文献

1. 陶世龙，万天丰，程捷．地球科学概论．北京：地质出版社，1999

2. 汪新文，林建平，程捷．地球科学概论．北京：地质出版社，2001

3. 刘本培，蔡运龙．地球科学导论．北京：高等教育出版社，2001

4. 杨文采．后板块地球内部物理学导论：北京：地质出版社，1999

5. 傅容珊，黄建华．地球动力学．北京：高等教育出版社，2001

6. 毕思文，许强．地球系统科学．北京：科学出版社，2002

7. 钱易，唐孝炎．环境保护与可持续发展．北京：高等教育出版社，2000

8. 刘南威，杨士弘，刘洪杰等．自然地理学．北京：科学出版社，2000

9. 中国科学院地球化学研究所．高等地球化学．北京：科学出版社，2000

10. 张宋祐．九曲黄河万里沙——黄河与黄土高原．北京：清华大学出版社，2000

11. 王鸿祯．地球动力学的演化观．见：周光召主编．共同走向科学——百名院士科技系列报告集（中）．北京：新华出版社，1997

12. 刘广志．入地“望远镜”——大陆科学钻探．见：朱光亚主编．中国科学技术前沿．上海：上海教育出版社，1998

13. 叶叔华主编．运动的地球——现代地壳运动和地球动力学研究及应用．长沙：湖南科学技术出版社，1997

14. 叶叔华，郑大伟．地球的自转运动及其与地球各圈层的相互作用．见：21世纪100个科学难题．长春：吉林科学技术出版社，1998

15. 孙宏烈主编．世界屋脊之谜——青藏高原形成演化环境变迁与生态系统的研究．长沙：湖南科学技术出版社，1997

16. 程裕淇．关于矿产资源的几个问题．见：周光召主编：共同走向科学——百名院士科技系列报告集（下）．北京：新华出版社，1997

17. 李德生，罗群．石油——人类文明的血液．北京：清华大学出版社，2002

18. 汪集旸，孙占学．神奇的地热．北京：清华大学出版社，2001

19. 陈梦熊．我国的水资源及其合理利用．见：叶叔华主编．院士展望二十一世纪．上海：上海科学技术出版社，2000

20. 张彭熹．沉默的宝藏——盐湖资源．北京：清华大学出版社，2000

21. 卢耀如．岩溶——奇峰异洞的世界．北京：清华大学出版社，2001

22. 金庆焕．海底矿产．北京：清华大学出版社，2001

23. 韩茂莉，程龙．大漠狂风——沙尘暴历史、现实思考．太原：山西人民出版社，2002

24. 任美锷．黄河——我们的母亲河．北京：清华大学出版社，2002

25. 陈颙．地震及其灾害的减轻．见：周光召主编．共同走

向科学——百名院士科技系列报告集（上）．北京：新华出版社，1997

26．谢学锦．化学定时炸弹和可持续发展．见：周光召主编．共同走向科学——百名院士科技系列报告集（中）．北京：新华出版社，1997

27．贾兰坡，张树政，殷鸿福等．生命的历程．桂林：广西师范大学出版社，2000

28．张昀．生物进化．北京：北京大学出版社，2001

29．刘永珏．澄江古生物群．昆明：云南教育出版社，2000

30．蒋志文，侯先光，吉学平等．生命的历程．昆明：云南科技出版社，2000

31．吴汝康．人类的起源和进化．见：周光召主编．共同走向科学——百名院士科技系列报告集（中）．北京：新华出版社，1997

32．马在田．数字地球与地球科学．见：叶叔华主编．院士展望二十一世纪．上海：上海科学技术出版社，2000

33．李德仁．数字地球飞入寻常百姓家．见：叶叔华主编．院士展望二十一世纪．上海：上海科学技术出版社，2000

34．欧阳自远，邹永廖，李春来．月球——人类走向深空的前哨站．北京：清华大学出版社，2002

35．陈阅增主编．普通生物学——生命科学通论．北京：高等教育出版社，2002

36．车自成，刘良，罗金海．中国及其邻区区域大地构造学．北京：科学出版社，2002

［Ｇｅｎｅｒａｌ Ｉｎｆｏｒｍａｔｉｏｎ］
书名＝地球科学的１００个基本问题
作者＝柴东洁编著
页数＝３２３
ＳＳ号＝１１２０７７８７
出版日期＝２００４年０１月第１版